



TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE TRACKING* MENGGUNAKAN KONTROL FUZZY TIPE-2 INTERVAL

MOCH.WAHYU ARDIATAMA
NRP 2412 100 076

Dosen Pembimbing
Dr.Imam Abadi,S.T,M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



Tugas Akhir -TF 141581

**PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI
DUA SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE*
TRACKING MENGGUNAKAN KONTROL FUZZY
TIPE-2 INTERVAL**

MOCHAMAD WAHYU ARDIATAMA
NRP 2412 100 076

Dosen Pembimbing
Dr. Imam Abadi, S.T.,M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



***FINAL PROJECT -TF 141581
DESIGN DUAL AXIS SOLAR TRACKING SYSTEMS
WITH ACTIVE TRACKING METHODS BASED
INTERVAL TYPE-2 FUZZY CONTROL***

MOCHAMAD WAHYU ARDIATAMA
NRP 2412 100 076

SUPERVISORS
Dr. Imam Abadi, S.T.,M.T.

*DEPARTMENT OG ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mochamad Wahyu Ardiatama

NRP : 2412100076

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul
“PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI DUA
SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE TRACKING*
MENGUNAKAN KONTROL FUZZY TIPE-2 INTERVAL”
adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar,
maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang
berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-
benarnya.

Surabaya, 25 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,

Mochamad Wahyu Ardiatama

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LEMBAR PENGESAHAN

**"PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI DUA
SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE TRACKING*
MENGUNAKAN KONTROL FUZZY TIPE-2 INTERVAL"**


TUGAS AKHIR

Oleh :

Mochamad Wahyu Ardiatama
NRP. 2412 100 076

Surabaya, 25 Juli 2017
Mengetahui / Menyetujui,

Pembimbing


Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.
NIPN. 19761006 199903 1 002

Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Akris Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1002
DEPARTEMEN
TEKNIK FISIKA

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LEMBAR PENGESAHAN

"PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE TRACKING* MENGUNAKAN KONTROL FUZZY TIPE-2 INTERVAL"

TUGAS AKHIR


Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S1 Teknik Fisika
Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :


MOCHAMAD WAHYU ARDIATAMA
NRP. 2412 100 076


Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.
2. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.
3. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
4. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

 Pembimbing

 Ketua
Penguji

 Penguji I

 Penguji II

SURABAYA
Juli, 2017

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERANCANGAN SISTEM PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU DENGAN METODE *ACTIVE TRACKING* MENGGUNAKAN KONTROL FUZZY TIPE-2 INTERVAL

Nama Mahasiswa : Moch.Wahyu Ardiatama
NRP : 2412 100 076
Pembimbing : Dr.Imam Abadi,S.T.,M.T.

Abstrak

Seiring meningkatnya kebutuhan listrik di Indonesia perlu adanya pemanfaatan sumber energi alternatif. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan di Indonesia adalah energi surya. Untuk memanfaatkannya diperlukan panel surya. Namun penggunaan panel surya memiliki kendala yaitu efisiensi yang kecil. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi panel surya adalah dengan menerapkan sistem penjejak matahari (*solar tracker*). Pada penelitian ini telah dirancang sebuah sistem penjejak matahari dengan metode *active tracking* menggunakan kontrol fuzzy tipe-2 interval. Dari hasil pengujian didapatkan hasil bahwa fuzzy tipe-2 interval dengan $FOU \pm 0,5$ memiliki indeks performansi yang paling baik. Saat set poin sudut elevasi 60^0 akan memiliki Tr 0,404 sekon, Ts 1,279 sekon, Maximum Overshoot 0% dan Error Steady-State 0,29%. Dan saat set poin sudut azimuth matahari 60^0 akan memiliki Tr 0,222 sekon, Ts 0,495 sekon, Maximum Overshoot 0% dan Error Steady-State 0,31%. Selain itu didapatkan bahwa kontrol fuzzy tipe-2 interval dengan MF berbentuk segitiga memiliki respon terbaik untuk *tracking* sudut elevasi matahari. Sedangkan untuk *tracking* sudut *azimuth* matahari, kontrol fuzzy tipe-2 interval dengan MF berbentuk trapesium memiliki respon terbaik. Serta Panel surya dengan sistem penjejak dengan penerapan kontrol fuzzy tipe-2 interval mengalami peningkatan daya sebesar 89,43 persen.

Kata Kunci : Fuzzy Tipe-2 Interval, Panel Surya, *Solar Tracker*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DESIGN DUAL AXIS SOLAR TRACKING SYSTEMS WITH ACTIVE TRACKING METHODS BASED INTERVAL FUZZY TYPE-2 CONTROL

***Student Name : Moch.Wahyu Ardiatama
NRP : 2412 100 076
Advisor Lecturer : Dr. Imam Abadi,S.T.,M.T.***

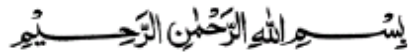
Abstract

The increasing electricity consumption in Indonesia is need for alternative energy sources utilization. One of alternative energy source is solar energy. For applying it, it's needed photovoltaic. But the problem to use photovoltaic is efficiency. One way to increase the efficiency is using solar tracker. In this project, have been designed dual axis solar tracking system with active tracking methods based interval fuzzy logic type-2. From simulation result, it's obtained that interval fuzzy type-2 with FOU ± 0.5 have the best response. For the set point of altitude angle 60° , it will have Tr 0,4 s, Ts 1,28 s, Maximum Overshoot 0% and Error Steady-State 0,29%. And for the set point of azimuth angle 60° , it will have Tr 0,222 s, Ts 0,495 s, Maximum Overshoot 0% dan Error Steady-State 0,31%. It also can be deduced that shape of membership function for pitch angle will give the best response is triangle membership functon. Whereas for yaw angle, its shape is trapezoid membership function. In implementation of interval fuzzy logic type-2 in PV with solar tracker , photovoltaic will have power efficiency about 89,43%.

Keywords: Interval Type-2 Fuzzy, Solar Panel, Solar Tracker

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR



Puji syukur Alhamdulillah kami panjatkan kehadiran Allah Subhanahu wa ta'ala atas karunia, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir tepat waktu.

Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T.,M.Si.,Ph.D. selaku ketua Departemen Teknik Fisika.
2. Kedua Orang Tua yang tercinta, terima kasih atas segala dukungan dan kepercayaan baik moril, spiritual dan material. Semoga selalu dilimpahkan rahmat dan hidayahNya.
3. Bapak Dr. Imam Abadi ,S.T.,M.T. selaku pembimbing, terima kasih atas bimbingan, motivasi dan masukan selama pengerjaan tugas akhir ini .
4. Tim dosen penguji memberikan kritik, saran dan masukan.
5. Ikhawah Thaybah yang selalu kebersamaian serta memberikan nasihat yang menyentuh kalbu
6. Achmadi, S.T. yang telah membantu dan memberikan arahan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
7. Alief Ghazi A selaku partner tugas akhir yang bersama-sama berjuang dalam pengerjaan tugas akhir.
8. Rekan tim *solar tracker* yang telah memotivasi dan memberikan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik.

Surabaya, 25 Juli 2017
Penulis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir.....	3
1.5 Sistematika Laporan... ..	3

BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Posisi Matahari	5
2.2 Panel Surya	6
2.3 <i>Solar Tracking System</i>	7
2.4 <i>Light Dependent Resistor(LDR)</i>	8
2.5 Motor DC.....	10
2.6 Logika Fuzzy Tipe-1.....	12
2.7 Logika Fuzzy Tipe-2.....	14

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Diagram Blok Pengendalian Sistem Penjejak Matahari Aktif.....	22
3.2 Prosedur Pengambilan Data Sistem	25
3.2.1 Pengambilan Data Sensor	25
3.2.2 Pengambilan Data Motor DC	27
3.3 Pemodelan Sistem Penjejak Matahari.....	30
3.3.1 Pemodelan Posisi Matahari.....	30

3.3.2	Pemodelan Motor DC	31
3.3.3	Pemodelan Sensor LDR.....	32
3.3.4	Pemodelan Panel Surya	33
3.3.5	Pemodelan <i>Controller</i>	34
3.4	Target Pencapaian Sistem Penjejak Matahari.....	41

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 43

4.1	Uji <i>Set Point</i> KFT2 Menggunakan 3 <i>Membership Function</i>	43
4.2	Uji <i>Set Point</i> KFT2 Menggunakan 5 <i>Membership Function</i>	53
4.3	Uji <i>Tracking</i> KFT2 Menggunakan 3 serta 5 <i>Membership Function</i>	63
4.4	Perbandingan Respon Uji <i>Set Point</i> dan <i>Tracking</i> KFT2 dengan Penerapan Variasi Bentuk MF.....	72
4.5	Penerapan KFT2 Interval Pada Perancangan Sistem Penjejak Matahari Dua Sumbu	91

BAB V PENUTUP 97

5.1	Kesimpulan.....	97
5.2	Saran	97

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Posisi Matahari	6
Gambar	2.2	Prinsip Kerja Panel Surya	7
Gambar	2.3	<i>Vertical dan Inclined Rotating Axis</i>	7
Gambar	2.4	Sensor LDR	9
Gambar	2.5	Konfigurasi Sensor LDR	9
Gambar	2.6	Rangkaian Motor DC	10
Gambar	2.7	<i>Motor Simulink Model</i>	12
Gambar	2.8	<i>Fuzzy Inference System Tipe-1</i>	13
Gambar	2.9	<i>Inference Engine Sugeno</i>	14
Gambar	2.10	<i>Inference Engine Mamdani</i>	14
Gambar	2.11	<i>Fuzzy Inference System Tipe-2</i>	15
Gambar	2.12	UMF,LMF dan FOU	15
Gambar	3.1	Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	20
Gambar	3.2	Diagram Blok <i>Solar Tracker</i> Sudut <i>Pitch</i>	23
Gambar	3.3	Diagram Blok <i>Solar Tracker</i> Sudut <i>Yaw</i>	24
Gambar	3.4	Konfigurasi LDR	26
Gambar	3.5	Kuat Pencahayaan Berbanding dengan Resistansi	26
Gambar	3.6	Kuat Pencahayaan Berbanding dengan Tegangan	27
Gambar	3.7	Konfigurasi Pengukuran Motor DC	28
Gambar	3.8	LCR meter	29
Gambar	3.9	Rangkaian Ekuivalen PV	33
Gambar	3.10	3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU $\pm 0,1$)	35
Gambar	3.11	3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU $\pm 0,3$)	35
Gambar	3.12	3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU $\pm 0,5$)	36
Gambar	3.13	Defuzzifikasi 3MF PWM motor DC	36
Gambar	3.14	5MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU $\pm 0,1$)	38
Gambar	3.15	5MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU $\pm 0,3$)	38

Gambar	3.16	5MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR ($\text{FOU} \pm 0,5$)	39
Gambar	3.17	Defuzzifikasi 5MF PWMmotor DC	39
Gambar	3.18	Rangkaian MATLAB/SIMULINK Uji <i>Set Point</i>	41
Gambar	3.19	Rangkaian MATLAB/SIMULINK Uji <i>Tracking</i>	41
Gambar	3.20	Rangkaian MATLAB/SIMULINK Sistem Penjejak Matahari Aktif Dua Sumbu	42
Gambar	4.1	Respon Sudut <i>Pitch</i> 3 MF dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	45
Gambar	4.2	Respon Sudut <i>Yaw</i> 3MF dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	48
Gambar	4.3	Respon Tegangan <i>Pitch</i> 3MF dengan <i>Set Point</i> (a) 1,91V (b) 2,57V (c) 3,07V	51
Gambar	4.4	Respon Tegangan <i>Yaw</i> 3MF dengan <i>Set Point</i> (a) 3,17V (b) 3,07V (c) 2,57V	52
Gambar	4.5	Respon Sudut <i>Pitch</i> 5MF dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	55
Gambar	4.6	Respon Sudut <i>Yaw</i> 5MF dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	58
Gambar	4.7	Respon Tegangan <i>Pitch</i> 5MF dengan <i>Set Point</i> (a) 1,96V (b) 2,57V (c) 3,07V	61
Gambar	4.8	Respon Tegangan <i>Yaw</i> 5MF dengan <i>Set Point</i> (a) 3,17V (b) 3,07V (c) 2,57V	62
Gambar	4.9	Respon Uji <i>Tracking</i> Sudut <i>Pitch</i> 3MF dan 5MF (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	65
Gambar	4.10	Respon Uji <i>Tracking</i> Sudut <i>Yaw</i> 3MF dan 5MF (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	67
Gambar	4.11	Respon Uji <i>Tracking</i> Tegangan <i>Pitch</i> 3MF dan 5MF (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	69
Gambar	4.12	Respon Uji <i>Tracking</i> Tegangan <i>Yaw</i> 3MF dan 5MF (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i>	71

		Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	
Gambar	4.13	Respon Sudut <i>Pitch Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	74
Gambar	4.14	Respon Tegangan <i>Pitch Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan <i>Set Point</i> (a) 1,96V (b) 2,57V (c) 3,07V	77
Gambar	4.15	Respon Sudut <i>Yaw Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan <i>Set Point</i> (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0	79
Gambar	4.16	Respon Tegangan <i>Yaw Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan <i>Set Point</i> (a) 3,17V (b) 3,07V (c) 2,57V	82
Gambar	4.17	Respon Uji <i>Tracking</i> Sudut <i>Pitch Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	84
Gambar	4.18	Respon Uji <i>Tracking</i> Sudut <i>Yaw Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	87
Gambar	4.19	Respon Uji <i>Tracking</i> Tegangan Keluaran LDR <i>Pitch Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i> Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	88
Gambar	4.20	Respon Uji <i>Tracking</i> Tegangan Keluaran LDR <i>Yaw Membership Function</i> Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) <i>Tracking</i> Naik (b) <i>Tracking</i>	90

		Turun (c) <i>Tracking</i> Naik-Turun	
Gambar	4.21	Hasil <i>Tracking</i> Sudut Elevasi Matahari	92
Gambar	4.22	Hasil <i>Tracking</i> Sudut Azimuth Matahari	92
Gambar	4.23	Tegangan Keluaran <i>Mobile PV</i> VS <i>Fixed PV</i>	93
Gambar	4.24	Arus Keluaran <i>Mobile PV</i> VS <i>Fixed PV</i>	94
Gambar	4.25	Daya Keluaran <i>Mobile PV</i> VS <i>Fixed PV</i>	94

DAFTAR TABEL

Tabel	3.1	Parameter – Parameter Motor DC	30
Tabel	3.2	Parameter – Parameter Panel Surya	34
Tabel	3.3	Defuzzifikasi 3MF (Input)	37
Tabel	3.4	<i>Rule Base</i> 3MF <i>Pitch</i>	37
Tabel	3.5	<i>Rule Base</i> 3MF <i>Yaw</i>	37
Tabel	3.6	Defuzzifikasi 5MF (Input)	40
Tabel	3.7	<i>Rule Base</i> 5MF <i>Pitch</i>	40
Tabel	3.8	<i>Rule Base</i> 5MF <i>Yaw</i>	40
Tabel	4.1	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Pitch</i> 3MF	46
Tabel	4.2	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Yaw</i> 3MF	49
Tabel	4.3	Indeks Performansi Tegangan Keluaran <i>Pitch</i> dan <i>Yaw</i> 3MF	53
Tabel	4.4	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Pitch</i> 5MF	56
Tabel	4.5	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Yaw</i> 5MF	59
Tabel	4.6	Indeks Performansi Tegangan <i>Pitch</i> dan <i>Yaw</i> 5MF	63
Tabel	4.7	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Pitch</i> dengan Variasi Bentuk MF	75
Tabel	4.8	Perbandingan Indeks Performansi Sudut <i>Yaw</i> dengan Variasi Bentuk MF	78
Tabel	4.9	Perbandingan Indeks Performansi Tegangan <i>Pitch</i> dengan Variasi Bentuk MF	80
Tabel	4.10	Perbandingan Indeks Performansi Tegangan <i>Yaw</i> dengan Variasi Bentuk MF	83

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan cukup melimpah. Salah satunya adalah energi surya. Pada hal ini Indonesia memiliki insolasi matahari rata-rata 4.8 KWh/m^2 per hari. Besarnya insolasi tersebut memiliki rincian di Indonesia bagian timur sebesar 5.1 KWh/m^2 per hari dan di bagian barat 4.5 KWh/m^2 per hari ^[1]. Hal ini perlu diupayakan untuk menjadi sumber energi alternatif pengganti energi fosil yang mendominasi sebagian besar produksi listrik negara. Tercatat dalam data Kementrian Energi Sumber Daya Mineral bahwa energi fosil menyuplai 41.15 % produksi listrik negara ^[2].

Pemanfaatan energi surya digunakan panel surya untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan panel surya dipengaruhi kuat pencahayaan matahari dan suhu permukaan panel surya ^[3]. Panel surya banyak digunakan pada unit Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penggunaan panel surya memiliki kendala utama yaitu kecilnya efisiensi yang dihasilkan yang hanya sekitar 16 % ^[4], sehingga dalam hal pemanfaatan energi surya Indonesia masih kurang. Tercatat dalam data Kementrian Energi Sumber Daya Mineral bahwa Indonesia hanya memiliki 56 unit PLTS dengan rata-rata per tahun menghasilkan 4.66 MW ^[2].

Untuk meningkatkan efisiensi panel surya diterapkan sistem penjejak matahari (*solar tracking system*). *Solar tracking system* merupakan sistem penjejakan posisi matahari yang memungkinkan panel surya mengikuti posisi matahari tiap waktu. Dalam hal ini, panel surya digerakan oleh motor yang dikendalikan oleh kontroler. Teknologi ini dapat meningkatkan kapabilitas panel surya untuk menyerap energi surya secara optimal. Pada penelitian yang telah dilakukan tahun 2015 tentang *Type-2 Fuzzy Logic Controller Based PV Passive Two-Axis Solar Tracking System* *solar tracking* didapatkan bahwa fuzzy tipe-2 dengan $\text{FOU} \pm 0,3$ memiliki respon yang paling baik dibandingkan dengan fuzzy tipe-1 serta fuzzy tipe-2

dengan $FOU \pm 0,1$ dan $\pm 0,2$. Hal ini dikarenakan respon dari sistem memiliki indeks performansi yang baik. Sebagai contoh saat set poin 45° maka akan memiliki T_s 6s, T_r 4s, *Maximum Overshoot* 11,1% serta *Error Steady-State* 1,6%. Dari penerapan kontrol tersebut akan dihasilkan efisiensi tertinggi sebesar 48,56% [5]. Selanjutnya pada tahun 2015 dilakukan penelitian dengan judul implementasi kontrol fuzzy pada sistem penjejak matahari dua derajat kebebasan diperoleh kenaikan daya di atas 30% serta maksimum *overshoot* 0.080% , *rise time* 7 detik , *settling time* 10 detik dan *error steady-state* 0.080%. Namun dalam penelitian ini digunakan kontrol fuzzy tipe-1 dan hanya menggunakan fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium (*combine*) [3]. Kemudian pada penelitian yang telah dilakukan tahun 2014 dengan judul rancang bangun *dual-axis pv solar tracker system* menggunakan *interval type-2 fuzzy logic controller* diperoleh bahwa arus keluaran pada panel surya dengan sistem penjejak naik 46.83% terhadap arus keluaran pada panel surya *fixed* serta kontrol fuzzy tipe-2 lebih baik daripada kontrol tipe-1. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah *passive tracking* [6].

Dalam rangka pengembangan *solar tracking system*, pada penelitian ini akan dilakukan perancangan sistem penjejak matahari dengan metode *active tracking* menggunakan kontrol fuzzy tipe-2 interval. Penggunaan kontrol fuzzy tipe-2 pada sistem penjejak matahari aktif diharapkan dapat mengatasi ketidakpastian dari fungsi keanggotaan variabel input sistem sehingga dapat menghasilkan efisiensi panel surya yang baik daripada penelitian sebelumnya.

1.2 Rumusan Permasalahan

Dari latar belakang diatas, permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah

- Bagaimana menentukan parameter – parameter sistem penjejak matahari aktif dua sumbu yang optimum?
- Bagaimana menentukan parameter – parameter kontrol fuzzy tipe-2 yang diimplementasikan pada sistem penjejak matahari aktif dua sumbu untuk meningkatkan efisiensi panel surya?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- Motor yang digunakan adalah motor DC.
- Variabel yang dikendalikan adalah sudut *pitch* dan *yaw*.
- Kontrol yang digunakan adalah kontrol fuzzy tipe-2 interval.
- Tidak membahas konsumsi daya pada komponen elektronik.
- Variasi dilakukan pada fungsi keanggotaan fuzzy tipe-2 interval.
- Metode *tracking* adalah *active tracking*.
- Input kontrol adalah eror dan *delta* eror tegangan ldr

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan yang ingin dicapai dari penulisan Tugas Akhir ini adalah:

- Menentukan nilai parameter – parameter sistem penjejak matahari aktif dua sumbu yang optimum.
- Menentukan nilai parameter – parameter kontrol fuzzy tipe-2 yang diimplementasikan pada sistem penjejak matahari aktif dua sumbu untuk meningkatkan efisiensi panel surya.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika dalam menulis laporan penelitian tugas akhir ini sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, rumusan permasalahan, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

BAB II TEORI PENUNJANG

Berisi tentang teori-teori yang berhubungan dengan konsep kendali logika *fuzzy*, dan teori yang mencakup penjelasan komponen LDR, panel surya dan motor DC yang akan digunakan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang metode yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir, cara pengambilan data, pemodelan komponen serta perancangan sistem yang akan diuji/disimulasikan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi mengenai hasil pengujian sistem yang dilakukan, dan juga hasil daya yang dihasilkan panel surya serta respon kontrol yang diterapkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan tugas akhir yang dilakukan berdasarkan data – data yang diperoleh serta saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir.

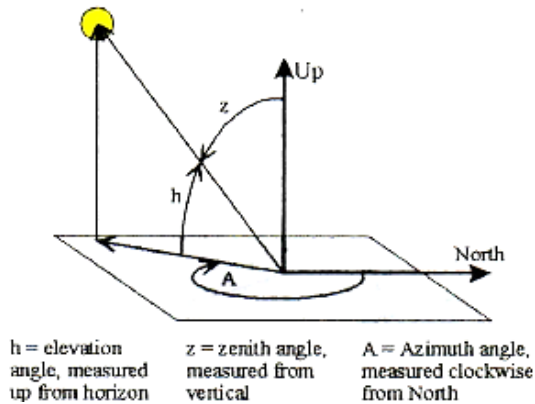
BAB II

DASAR TEORI

Penelitian tentang *solar tracker* mengalami perkembangan secara bertahap baik dari segi metode *tracking* atau kontrol pada sistem yang digunakan. Penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya tentang “ *Type-2 Fuzzy Logic Controller Based PV Passive Two-Axis Solar Tracking System* ”. Penelitian tersebut menggunakan kontrol fuzzy tipe-2 interval dengan metode *passive tracking*, namun hanya menggunakan satu variasi fungsi keanggotaan (*membership function*), yaitu bentuk trapesium-segitiga. Pada sistem penjejak matahari yang dikembangkan untuk penelitian ini menggunakan sistem penjejak matahari dengan metode *active tracking* menggunakan kontrol fuzzy tipe-2 interval yang menerapkan variasi *membership function* dalam hal bentuk, oleh karena itu beberapa kajian pustaka yang menjadi teori pendukung penelitian dibahas pada bab ini.

2.1 Posisi Matahari

Posisi matahari harian dapat ditentukan menggunakan koordinat bumi. Koordinat bumi yang menjadi penentu posisi matahari yaitu sudut *azimuth*, sudut *altitude/elevasi*, dan sudut *zenith*. Ketiga sudut tersebut dipengaruhi oleh perhitungan yang berdasarkan sudut deklinasi, *hour angle*, dan posisi lintang di bumi. Pada dasarnya, sudut deklinasi (δ) merupakan sudut yang berada diantara garis yang menghubungkan titik pusat matahari dengan bumi dan proyeksi di bidang *equator*, dengan nilai sudut berada pada jangkauan $-23.45^{\circ} - 23.45^{\circ}$. Sudut ini bernilai positif ketika berkas sinar matahari melewati bagian utara bumi. Sudut jam (*hour angle*) (ω) merupakan sudut antara meridian lokal serta posisi matahari dalam satu jam yaitu bumi berotasi 360° setiap 24 jam, sehingga dapat dihitung secara matematis bahwa nilai *hour angle* adalah 15° setiap satu jam [7].

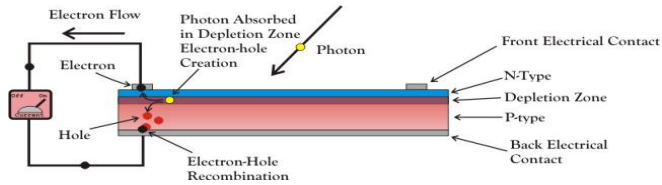


Gambar 2.1 Posisi Matahari^[7]

2.2 Panel Surya

Panel surya adalah suatu divais yang berfungsi untuk mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Pada dasarnya panel surya terdiri atas sejumlah sel surya yang disusun secara seri ataupun paralel. Pada setiap sel surya yang menyusun panel surya akan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 0.5 hingga 0.6 Volt ^[8].

Sistem panel surya bekerja dengan prinsip efek *photovoltaic*. Penyerapan energi foton matahari pada lapisan deplesi akan menghasilkan pasangan elektron *hole* jika energi foton yang diserap melebihi energi gap material sel surya. Elektron yang terbentuk akan mengalir melewati *front electrical contact* / konduktor bagian atas, sedangkan *hole* melewati lapisan deplesi menuju semikonduktor tipe-p. Setelah melewati beban, elektron akan menuju *back electrical contact* dan pada akhirnya kembali bertemu *hole*. Satu siklus proses tersebut dinamakan rekombinasi yang dapat menghasilkan energi listrik. Proses ini akan berlanjut setiap energi foton diserap ^[3].

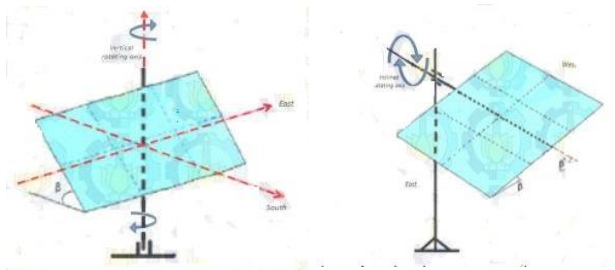


Gambar 2.2 Prinsip Kerja Panel Surya^[3]

2.3 Solar Tracking System

Solar tracking system merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk mengendalikan orientasi panel surya terhadap posisi matahari sehingga intensitas cahaya matahari dapat diserap maksimum ^[6].

Solar tracking system secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *single* dan *dual axis*. Untuk *single axis* dibagi menjadi dua yaitu *vertical rotating axis* dan *inclined rotating axis*. *Vertical rotating axis* merupakan sistem penjejak yang digunakan untuk mengendalikan sudut *azimuth* dari timur ke barat. Sedangkan *inclined rotating axis* merupakan sistem penjejak yang digunakan mengendalikan sudut *tilt*. Untuk sistem penjejak *dual axis* menggabungkan antara *vertical rotating axis* dan *inclined rotating axis* ^[6].



Gambar 2.3 Vertical dan Inclined Rotating Axis^[6]

Berdasarkan metode penjejakan, sistem *solar tracker* dibagi menjadi dua, yaitu metode pasif dan aktif. Metode penjejak pasif adalah metode yang proses penjejakannya tidak melakukan pengukuran langsung terhadap besaran fisis dari objek atau teknik

penjejakan didasarkan atas perhitungan astronomi, sedangkan metode penjejak aktif adalah metode yang proses penjejakannya melakukan pengukuran langsung terhadap objek [9].

2.4 Light Dependent Resistor (LDR)

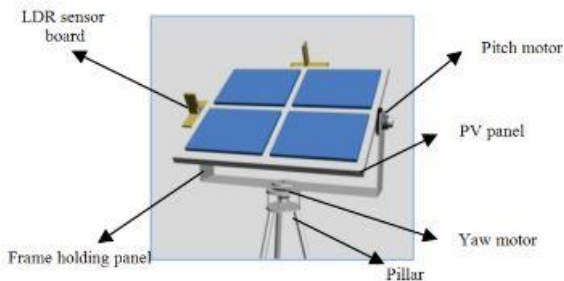
Light Dependent Resistor (LDR) merupakan salah satu jenis sensor cahaya. LDR dibuat dari lapisan tipis semikonduktor seperti *silicon*, *selenium*, atau *cadmium sulfide (Cds)* atau elemen-elemen sejenisnya. Sensor LDR ini berfungsi untuk mengetahui besarnya kuat pencahayaan cahaya dari matahari dengan cara mengirimkan *signal* pada *controller* yang akan mengatur putaran motor DC. Putaran motor DC akan mengubah orientasi panel surya mendekati tegak lurus terhadap arah datangnya cahaya matahari sehingga energi cahaya yang diserap panel surya menjadi maksimum. Sesuai dengan namanya *Light Dependent Resistor (LDR)*, sensor ini menghasilkan hambatan sebagai keluaran dari besarnya kuat pencahayaan cahaya yang telah dibaca.

Prinsip kerja LDR adalah ketika cahaya matahari melingkupi permukaan LDR, maka hambatan dari LDR akan semakin menurun sehingga arus dan tegangan yang mengalir melalui LDR akan menurun. Prinsip inilah yang dimanfaatkan sebagai sensor cahaya [7].



Gambar 2.4 Sensor LDR^[7]

Pada sistem penjejak matahari dua derajat kebebasan, LDR diaplikasikan pada posisi timur, barat, selatan dan utara. Dengan ketentuan, antara LDR barat dan timur serta utara dan selatan diberikan *balancer*. *Balancer* ini berfungsi sebagai pemberi efek bayangan pada salah satu sisi LDR. Sehingga apabila cahaya matahari jatuh tegak lurus pada sensor LDR, maka bayangan dari *balancer* akan menutupi sensor LDR yg lain. Hal ini mengakibatkan LDR yang tertutupi bayangan *balancer* akan memiliki tegangan keluaran yang lebih besar daripada LDR di sisi lainnya yang tidak tertutupi bayangan. Kemudian selisih tegangan antara dua LDR tersebut dijadikan sebagai masukan menuju kontroler (*error* tegangan serta *delta error* tegangan) untuk diproses ^[10].

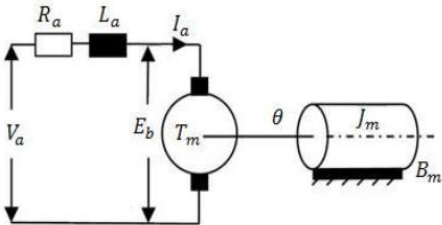


Gambar 2.5 Konfigurasi Sensor LDR^[10]

2.5 Motor DC

Motor DC adalah sebuah motor yang digerakkan oleh listrik searah (DC). Motor DC terdiri dari 2 bagian penting yaitu kumparan medan (*stator*) dan kumparan jangkar (*rotor*). Kumparan medan (*stator*) adalah bagian motor DC yang tidak bergerak sedangkan kumparan jangkar (*rotor*) merupakan bagian motor DC yang berputar. Prinsip kerja dari motor DC yaitu ketika arus listrik masuk pada kumparan medan (*stator*) akan menimbulkan medan magnet yang akan melingkupi kumparan jangkar (*rotor*) dengan arah tertentu sehingga *rotor* dapat berputar. Motor DC dalam sistem penjejak

matahari akan digunakan sebagai *actuator* yang akan menggerakkan panel surya sesuai dengan posisi matahari atas perintah dari *controller* ^[11].



Gambar 2.6 Rangkaian Motor DC^[12]

Sebuah kumparan motor dapat dimodelkan sebagai resistor secara seri dengan induktor. Ketika motor memiliki kecepatan nol, tegangan yang dihasilkan yaitu tegangan EMF. Tegangan EMF proporsional dengan kecepatan. Menurut Hukum Tegangan Kirchoff :

$$V(t) = Ra \cdot Ia(t) + La \cdot \frac{dIa(t)}{dt} + Eb(t) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana V adalah tegangan yang diaplikasikan ke motor

$$Eb(t) = Kb \cdot \omega(t) \dots\dots\dots (2.2)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor sebanding dengan arus. Menurut Hukum Newton Kedua (rotasi) :

$$Tm(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \cdot \omega(t) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana T_m adalah torsi motor

$$T(t) = Kt \cdot Ia(t) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

- Va = Tegangan Armatur (V)
- Ra = Resistansi Armatur (R)

L_a	= Induktansi Armaturn (H)
I_a	= Arus Armaturn (A)
E_b	= <i>Back</i> EMF (V)
ω	= Kecepatan Angular (rad/s)
T_m	= Torsi Motor (Nm)
Θ	= Posisi Angular <i>Shaft</i> Rotor (rad)
J_m	= Inersia Motor (Nm.s ²)
B_m	= <i>Viscous Friction Coefficient</i> (Nm.sec/rad)
K_t	= Konstanta Torsi (Nm/A)
K_b	= <i>Back</i> EMF <i>Constant</i> (Vs/rad)

Persamaan (2.1) dan (2.3) menggambarkan perilaku dinamis dari motor. Persamaan (2.1), (2.2), (2.3) dan (2.4) dapat diatur kembali seperti pada (2.5) dan (2.6) untuk pembuatan blok diagram.

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b \cdot \omega(t) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$K_t \cdot I_a(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \cdot \omega(t) \dots\dots\dots (2.6)$$

Transformasi *Laplace* dari persamaan (5) dan (6)

$$V_a(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot I_a(s)s + K_b \cdot \omega(s) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$K_t \cdot I_a(s) = J_m \cdot \omega(s)s + B_m \cdot \omega(s) \dots\dots\dots (2.8)$$

Jika arus didapatkan dari persamaan (8) dan disubstitusi ke persamaan (7)

$$V_a(s) = \omega(s) \cdot \frac{1}{K_t} \cdot [L_a \cdot J_m \cdot s^2 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s + (R_a \cdot B_m + K_b \cdot K_t)] \dots\dots\dots (2.9)$$

Kemudian hubungan antara kecepatan *shaft* rotor dan penggunaan tegangan armature dapat direpresentasikan dalam fungsi transfer berikut ini.

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{[L_a \cdot J_m \cdot s^2 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s + (R_a \cdot B_m + K_b \cdot K_t)]} \dots\dots\dots (2.10)$$

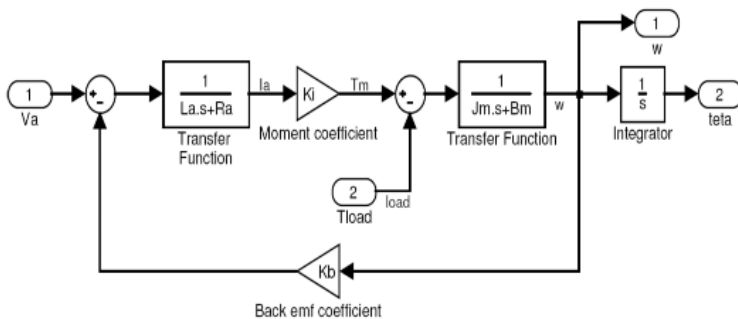
Hubungan antara posisi dan kecepatan yaitu :

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \omega(s) \dots\dots\dots (2.11)$$

Kemudian fungsi transfer antara posisi *shaft* dan tegangan armature pada saat tidak ada beban yaitu :

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{[L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a B_m) s^2 + (R_a B_m + K_b K_t) s]} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dari persamaan 10, dapat digambarkan ke dalam model Matlab/Simulink untuk Motor DC ^[12].



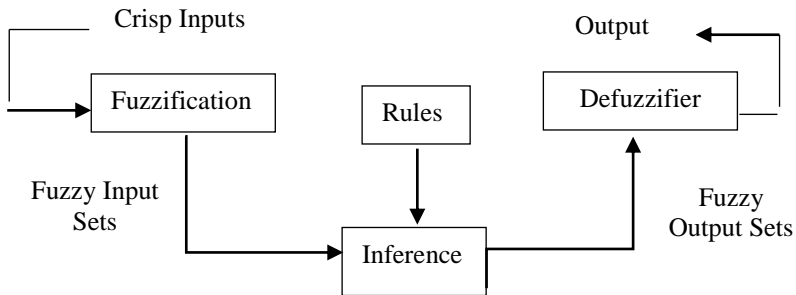
Gambar 2.7 *Motor Simulink Model*^[12]

2.6 Logika Fuzzy Tipe-1

Logika fuzzy tipe-1 adalah metodologi kontrol yang digunakan untuk menggambarkan suatu sistem. Logika fuzzy merupakan suatu proses pengambilan keputusan ditentukan oleh persamaan logika bukan persamaan differensial ^[3].

Ada beberapa keuntungan penggunaan logika fuzzy yaitu mudah dimengerti, pemodelan matematik sederhana, dapat memodelkan fungsi – fungsi non linier yang kompleks, serta mengaplikasikan pengalaman tanpa proses pelatihan^[3].

Berikut ini adalah *fuzzy inference system* digambarkan seperti gambar berikut.



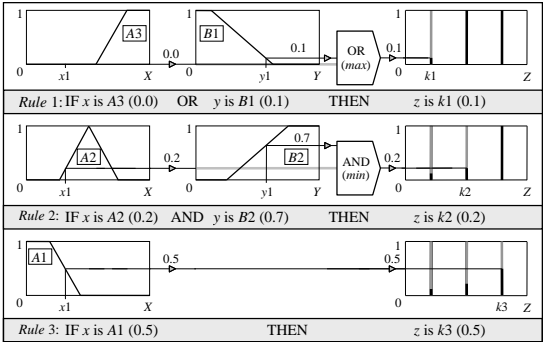
Gambar 2.8 *Fuzzy Inference System tipe-1*^[3]

Sistem inferensi dari fuzzy tipe satu di atas memiliki komponen-komponen sebagai berikut:

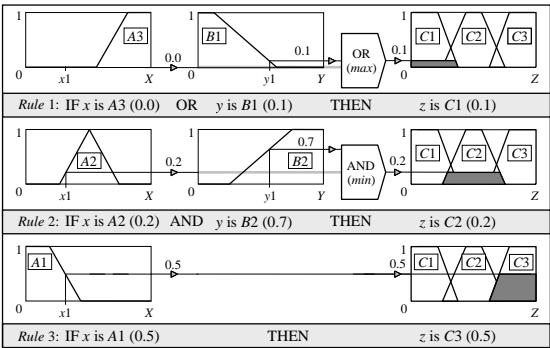
- *Crisp Input Value*
Masukan pada fuzzy inference sistem berupa *crisp* atau bilangan real.
- *Fuzzification*
Suatu proses pengubahan nilai tegas/real ke dalam fungsi keanggotaan fuzzy.
- *Rule Based*
Suatu bentuk aturan relasi/implikasi , *if-then rules*.
- *Inference Engine*
Proses implikasi dalam menalar nilai masukan untuk menentukan nilai keluaran sebagai bentuk pengambil keputusan.
- *Defuzzification*
Proses pemetaan dari himpunan fuzzy ke himpunan tegas ^[3].

Terdapat beberapa metode dalam inferensi fuzzy. Dua metode yang sering digunakan dalam proses inferensi fuzzy yaitu metode mamdani dan sugeno. Perbedaan mendasar antara dua metode ini adalah keluaran dari *inference engine*. Untuk metode mamdani, keluaran dari *inference engine* adalah *fuzzy sets*. Dan untuk menentukan nilai *output* dari defuzzifier digunakan perhitungan

centre of gravity. Sedangkan untuk metode sugeno, keluaran dari inference engine adalah berupa bilangan tegas (crisp). Untuk menentukan besarnya output dari defuzzifier digunakan perhitungan *weighted area*. Berikut ini adalah proses dari masing – masing metode dalam penentuan nilai output sistem fuzzy.



Gambar 2.9 Inference Engine Sugeno ^[13]

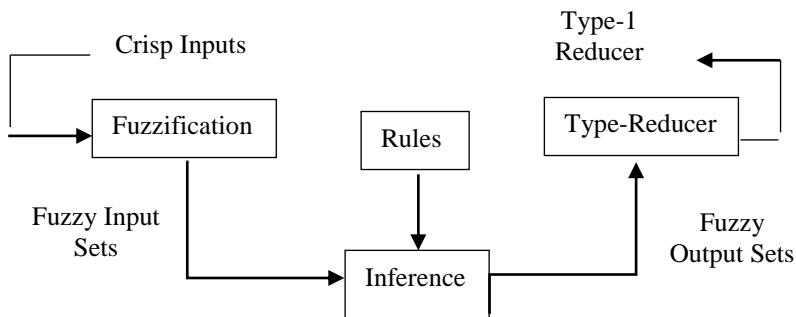


Gambar 2.10 Inference Engine Mamdani ^[14]

2.7 Logika Fuzzy Tipe-2

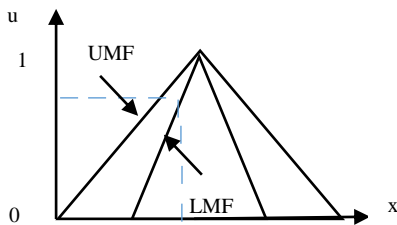
Logika fuzzy tipe-2 merupakan pengembangan dari logika fuzzy tipe-1. Logika fuzzy tipe-2 mampu mengatasi kelemahan pada logika fuzzy tipe-1 yaitu ketidakpastian dalam pemodelan fungsi keanggotaan. Ketidakpastian ini direpresentasikan dalam derajat

keanggotaan sekunder. Dalam logika fuzzy tipe-2 interval, derajat keanggotaan sekunder bernilai 1 ^[5]



Gambar 2.11 *Fuzzy Inference System Tipe-2*^[5]

Fuzzifikasi bertujuan untuk mengubah nilai tegas ke dalam himpun an fungsi keanggotaan fuzzy. Rentang dari derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy yaitu antara 0 hingga 1. Dalam logika fuzzy tipe-2 interval, fungsi keanggotaan dibedakan menjadi 2 jenis yaitu *upper membership function* dan *lower membership function*. Dua fungsi keanggotaan ini membatasi daerah yang terletak diantaranya yang disebut *footprint of uncertainty* (FOU).



Gambar 2.12 UMF,LMF dan FOU^[5]

Operasi logika fuzzy berlaku jika jumlah masukan lebih dari satu. Pada logika fuzzy tipe-2, operator yang digunakan sama dengan operator yang digunakan dalam fuzzy tipe-1 yaitu AND dan OR. Hasil dari operator AND adalah derajat keanggotaan minimum dari dua atau lebih masukan. Sedangkan hasil operator OR adalah derajat keanggotaan maksimum dari dua atau lebih masukan.

Kaidah aturan (*rule base*) merupakan bagian utama dari logika fuzzy. Misal terdapat dua masukan dan satu keluaran. Input berupa error dan delta error serta output berupa sinyal kontrol. Domain masukan error dibagi ke dalam sejumlah fungsi keanggotaan, N ($N=2m-1, m>0$) dengan label F^i_1 ($i = 1, 2, \dots, N$). Masukan perubahan error juga dibagi ke dalam sejumlah fungsi keanggotaan, N ($N=2m-1, m>0$) dengan label F^j_2 ($j = 1, 2, \dots, N$). Sehingga jumlah kombinasi *rule base* yang mungkin adalah N^2 , serta format *rule base* (R) ke-k adalah

$$R^k : \text{If } e \text{ is } F^i_1 \text{ and } e' \text{ is } F^j_2 \text{ then } u \text{ is } Z^k ; (i, j = 1, 2, \dots, N)$$

Inferensi fuzzy terdiri dari proses implikasi dan agregasi. Implikasi yaitu proses menentukan derajat keanggotaan keluaran dari masing-masing *rule base* dengan menggunakan operator fuzzy. Sedangkan agregasi adalah proses mengkombinasikan semua derajat keanggotaan keluaran masing-masing *rule base* menjadi derajat keanggotaan tunggal [6].

Fuzzy tipe-2 memiliki komponen yang dinamakan *type-reducer* yang mengubah fuzzy tipe-2 menjadi fuzzy tipe-1. Kemudian fuzzy tipe-1 melewati *defuzzifier* yang diubah menjadi *crisp output*. Berikut ini adalah rumus perhitungan *type-reducer*.

$$Y = [Y_1, Y_r] = \int_{y^1 \in [D^1_1, D^1_2]} \dots \int_{y^M \in [D^M_1, D^M_2]} \dots \int_{f^1 \in [E^1_1, E^1_2]} \dots \int_{f^M \in [E^M_1, E^M_2]} 1 / \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \dots \dots \dots (2.13)$$

Nilai *interval set* (fuzzy tipe-1) ditentukan oleh dua titik akhir yaitu Y_l dan Y_r . Nilai f_i dan y_i diasosiasikan dengan y_l dan dinotasikan oleh f_l^i dan y_l^i , sedangkan f_i dan y_i diasosiasikan dengan y_r dinotasikan oleh f_r^i dan y_r^i . Kemudian dari persamaan 2.13 dapat ditulis sebagai berikut.

$$Y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$Y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \dots\dots\dots (2.15)$$

Keluaran dari *type-reducer* menghasilkan nilai *interval set* yang kemudian masuk *defuzzifier*. Nilai *crisp output* dapat ditentukan dengan persamaan 2.16 ^[15].

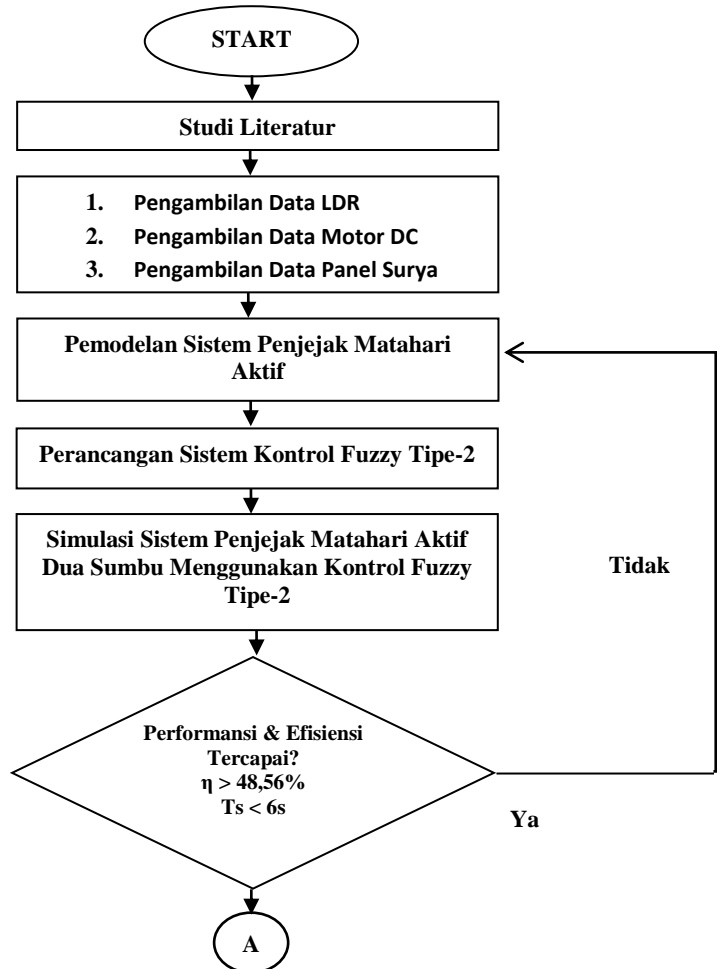
$$Y(x) = \frac{Y_l + Y_r}{2} \dots\dots\dots (2.16)$$

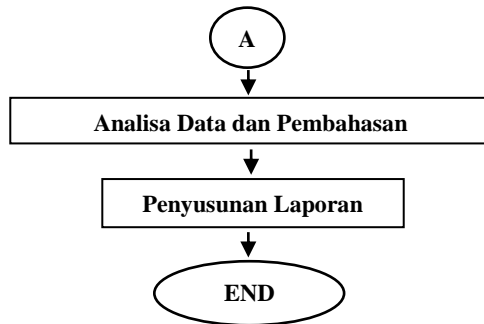
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada BAB III ini menjelaskan tentang tahapan-tahapan perancangan serta pemodelan matematis dari sistem panel surya, berikut merupakan diagram alir tugas akhir.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Berikut ini adalah tahapan - tahapan pengerjaan tugas akhir yang dilakukan

a. Studi Literatur

Studi literatur ini merupakan pengumpulan informasi yang berkaitan dengan komponen-komponen yang berkaitan dengan tugas akhir. Dengan harapan akan terbentuk konsep yang rinci dan jelas untuk pengerjaan tugas akhir. Berikut ini referensi utama dalam pengerjaan tugas akhir:

- Imam Abadi. 2015. *"Type-2 Fuzzy Logic Controller Based PV Passive Two-Axis Solar Tracking System"*.
- Imam Abadi. 2015. *"Design and Implementation of Active Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller"*.
- Karin Aryanti P. 2015. *"Perancangan Sistem Pengendalian Sudut Pitch dan Yaw pada Panel Surya Menggunakan Metode Fuzzy PSO"*.
- Nurika Brilianti. 2015. *"Implementasi Kontrol Fuzzy pada Sistem Penjejak Matahari Dua Derajat Kebebasan"*.
- Catur Hilman A.H.B.B. 2014. *"Rancang Bangun Dual-Axis PV Solar Tracker System Menggunakan Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller"*.
- Manafeddin Namazov , Onur Bosturk . 2010 . *"DC Motor Position Control Using Fuzzy Proportional-Derivative Controllers with Different Defuzzification Methods"*

b. Pengambilan Data di Lapangan

Data yang diambil meliputi data spesifikasi panel surya, data sensor ldr dan data dari motor DC. Pengambilan data diperoleh dari *data sheet* komponen atau melalui eksperimen dan pengukuran. Data spesifikasi dari panel surya yang diambil meliputi dimensi, berat, *maximum power*, *Open Circuit Voltage*, *Short Circuit Current*, *Maximum Power Voltage*, *Maximum Power Current*, *Working Temperature*, *Tolerance* dan *Maximum System Voltage*. Untuk data sensor ldr yang diambil adalah data hubungan tegangan dan resistansi dengan intensitas matahari. Sedangkan data motor DC yang diambil meliputi data konstanta tegangan, konstanta torsi, Inersia, resistansi, induktansi serta *viscous friction coefficient*.

c. Pemodelan Sistem Penjejak Matahari Aktif

Pemodelan sistem penjejak matahari aktif dilakukan setelah mendapatkan karakteristik serta parameter yang dibutuhkan dari tiap komponen. Pemodelan sistem penjejak matahari meliputi pemodelan sensor ldr yang akan menjadi input sistem, pemodelan dari motor DC yang akan menjadi *actuator* dari sistem serta pemodelan dari panel surya.

d. Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy Tipe-2 Interval

Perancangan sistem kontrol logika fuzzy tipe-2 interval meliputi penentuan fungsi keanggotaan, batas dari variabel fungsi keanggotaan serta *rule base*. Dalam perancangan sistem kendali ini akan dilakukan beberapa variasi fungsi keanggotaan. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan fungsi keanggotaan yang sesuai pada sistem penjejak matahari.

e. Simulasi Sistem Penjejak Matahari Aktif Dua Sumbu Menggunakan Kontrol Fuzzy Tipe-2

Simulasi dari semua sistem yang telah dibuat akan dilakukan di *software* matlab/simulink. Dari simulasi ini akan dicari data kualitatif dan kuantitatif dari sistem yang telah dibuat. Jika indeks performansi dan efisiensi sesuai target, maka akan berlanjut ke tahap analisa data. Sedangkan jika indeks performansi serta efisiensi belum memenuhi target, maka proses akan diulang dari perancangan sistem kontrol fuzzy tipe-2.

f. Analisa Data dan Pembahasan

Data-data yang akan dianalisa terdiri atas data indeks performansi dari sistem penjejak matahari aktif. Dalam hal ini akan dilakukan perbandingan antara indeks performansi dari kontrol fuzzy tipe-1 dan tipe-2 serta akan dilakukan variasi fungsi keanggotaan dari logika fuzzy. Selain data indeks performansi, data daya output dari sistem penjejak matahari aktif akan dibandingkan dengan sistem panel surya tanpa penjejak.

g. Penyusunan Laporan

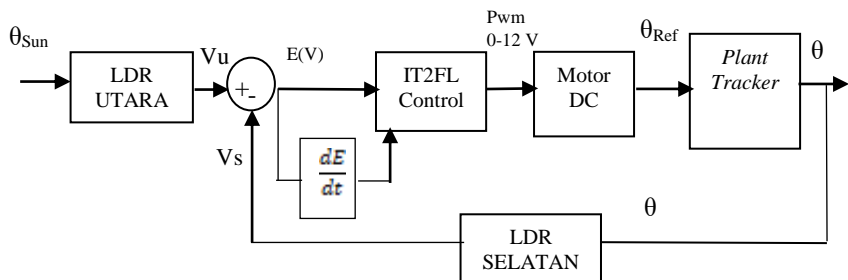
Penyusunan laporan adalah tahap terakhir dalam pengerjaan tugas akhir ini. Laporan harus disusun secara sistematis dari awal sampai akhir agar memudahkan dalam penyampaian pelaksanaan tugas akhir ini.

3.1 Diagram Blok Pengendalian Sistem Penjejak Matahari Aktif

Penelitian ini secara umum membahas tentang pengendalian. Sistem yang dikendalikan yaitu sistem penjejak matahari aktif dua sumbu yaitu *pitch* dan *yaw*. Berikut adalah komponen utama dari sistem penjejak matahari aktif meliputi sensor, kontroler, aktuator serta plant.

- Sensor : LDR (*pitch* dan *yaw*)
- Aktuator : Motor DC
- Kontroler: Logika Fuzzy Tipe-2
- Plant : Panel Surya

Berikut ini merupakan diagram blok *solar tracker* sudut *pitch* yang menjelaskan proses kinerja sistem dan komponen penyusunnya, dapat digambarkan dalam diagram blok sebagai berikut.

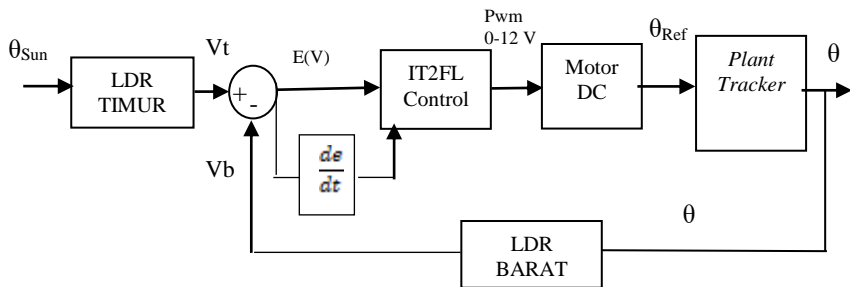


Gambar 3.2 Diagram Blok *Solar Tracker* Sudut *Pitch*

- *Set point* pada sistem ini adalah posisi matahari (sudut elevasi matahari) serta kuat pencahayaan matahari yang diterima oleh LDR utara yang direpresentasikan melalui tegangan LDR utara.
- Variabel yang dikendalikan adalah posisi panel surya (sudut *pitch*) terhadap posisi matahari (sudut elevasi). Posisi panel surya diharapkan selalu menghadap ke arah posisi matahari. Hal ini dikendalikan berdasarkan perbedaan intensitas cahaya matahari yang diterima LDR utara dan LDR selatan yang dipengaruhi oleh besarnya sudut elevasi matahari dan sudut *pitch*. Apabila sudut *pitch* memiliki nilai yang sama dengan sudut elevasi maka besarnya intensitas cahaya yang diterima kedua LDR akan sama. Sehingga kedua LDR akan memiliki tegangan keluaran sama. Hal ini mengakibatkan error tegangan sama dengan nol. Dan sebaliknya apabila sudut *pitch* tidak sama dengan sudut elevasi, maka intensitas yang diterima kedua LDR tidak sama. Hal ini mengakibatkan tegangan keluaran kedua LDR tidak sama sehingga menghasilkan *error* tegangan.
- Variabel yang dimanipulasi adalah pwm motor DC. Nilai dari pwm motor DC ini akan menentukan nilai tegangan yang harus diberikan pada motor DC. Tegangan yang diberikan pada motor DC menyebabkan putaran yang akan mengubah orientasi panel surya hingga tegak lurus terhadap (menghadap) posisi matahari.

- Sinyal *feedback* dari sensor LDR utara adalah tegangan yang dihasilkan LDR selatan
- Kendali menggunakan logika *fuzzy tipe-2 interval*, dengan masukan *error* tegangan dan menghasilkan keluaran sinyal kendali PWM motor

Berikut merupakan diagram blok serta penjelasan dari sistem pengendalian *solar tracker* sudut yaw adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Diagram Blok *Solar Tracker* Sudut Yaw

- *Set point* adalah posisi matahari (sudut *azimuth*) serta kuat pencahayaan matahari yang diterima LDR timur yang direpresentasikan melalui tegangan LDR timur.
- Variabel yang dikendalikan adalah posisi panel surya (sudut *yaw*) terhadap posisi matahari (sudut *azimuth*). Posisi panel surya dikendalikan agar selalu tegak lurus (menghadap) terhadap posisi matahari. Hal ini dikendalikan berdasarkan perbedaan intensitas cahaya yang diterima di sisi LDR timur dan LDR barat yang ditentukan oleh besarnya sudut *azimuth* dan sudut *yaw*. Jika sudut *yaw* memiliki nilai yang sama dengan sudut *azimuth* maka besarnya intensitas cahaya yang diterima kedua LDR sama besar. Sehingga tegangan keluaran kedua LDR sama dan mengakibatkan *error* tegangan sama dengan nol. Sedangkan apabila sudut *yaw* dan *azimuth* tidak sama, maka besarnya intensitas yang diterima kedua LDR berbeda sehingga tegangan

keluaran kedua LDR berbeda. Hal ini mengakibatkan terjadi *error* tegangan.

- Variabel yang dimanipulasi adalah pwm motor DC dengan memberikan tegangan yang menyebabkan perubahan berupa posisi angular (θ) dari motor DC. Jika posisi angular motor DC berubah, maka posisi panel akan berubah hingga tegak lurus matahari
- Sinyal *feedback* dari sensor LDR timur adalah tegangan yang dihasilkan LDR barat
- Kendali menggunakan logika *fuzzy* tipe-2 interval, dengan masukan *error* tegangan dan menghasilkan keluaran sinyal kendali PWM motor

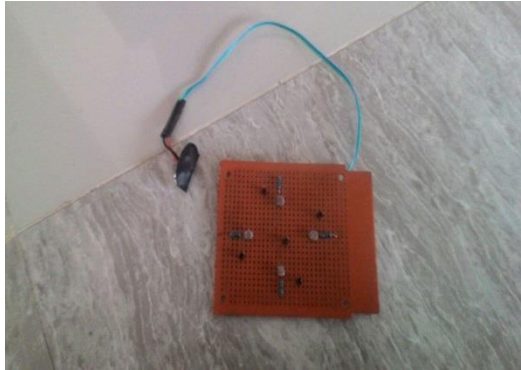
3.2 Prosedur Pengambilan Data Sistem

Pada sistem panel surya mempunyai *input* berupa sudut matahari, *output* yang dihasilkan yaitu respon sudut motor DC (*pitch* dan *yaw*) terhadap sudut matahari. Selain itu, respon tegangan LDR juga dilihat dengan membandingkan antara tegangan LDR utara dengan selatan (*pitch*) dan LDR barat dan timur (*yaw*).

3.2.1 Pengambilan Data Sensor

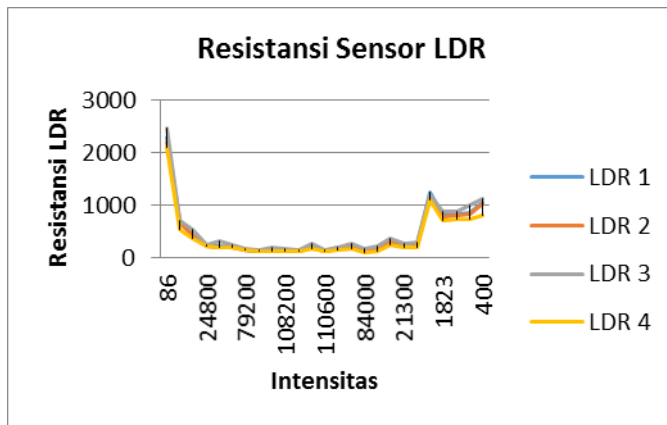
Pada sistem penjejak matahari aktif dua sumbu, digunakan sensor LDR untuk memperkirakan posisi matahari. Dalam sistem ini digunakan 4 buah sensor LDR yang diletakkan pada 4 posisi yaitu timur, barat, utara dan selatan. Pengambilan data sensor LDR dilakukan untuk mengetahui linearitas antara kuat pencahayaan yang diterima oleh sensor LDR berbanding dengan resistansi dan tegangan yang dihasilkan oleh sensor LDR

Untuk pengambilan data sensor LDR dibutuhkan beberapa alat pendukung yaitu avometer, adaptor 5VDC, Lux meter, konfigurasi *voltage divider* beserta sensor LDR. Konfigurasi sensor LDR beserta *voltage divider* dapat dilihat pada gambar 3.4

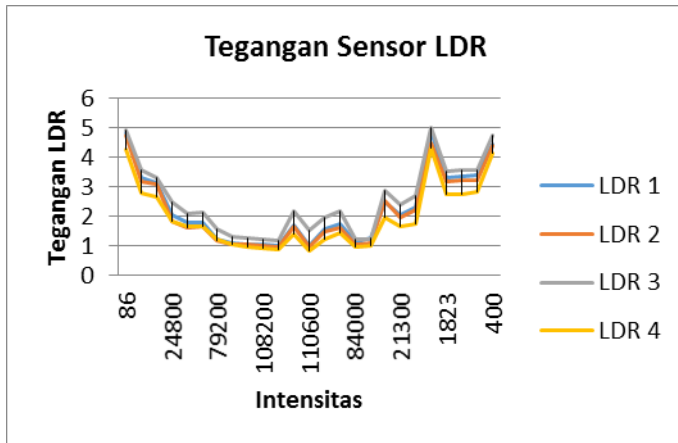


Gambar 3.4 Konfigurasi LDR

Berikut merupakan grafik hasil pengambilan data sensor LDR kuat pencahayaan berbanding dengan tegangan dan resistansi sensor LDR.



Gambar 3.5 Kuat Pencahayaan Berbanding dengan Resistansi

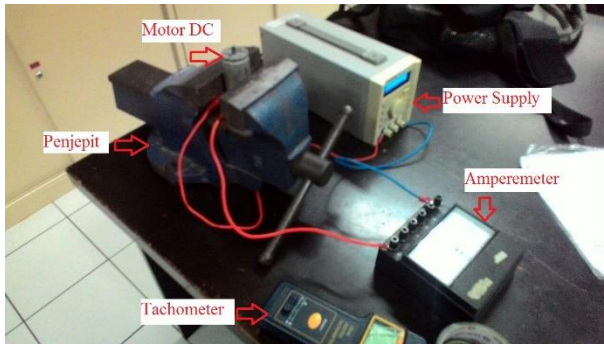


Gambar 3.6 Kuat Pencahayaan Berbanding dengan Tegangan

3.2.2 Pengambilan Data Motor DC

Motor yang digunakan pada sistem panel surya yaitu motor DC 12 VDC. Pada sistem panel surya menggunakan 2 buah motor DC yang identik. Masing-masing motor DC digunakan untuk menggerakkan panel dengan sudut *pitch* dan *yaw*. Pengambilan data motor DC dilakukan untuk mendapatkan beberapa parameter motor yang akan digunakan untuk pemodelan. Parameter-parameter yang dicari yaitu Konstanta Tegangan (K_e), Konstanta Torsi (K_t), Inersia Motor (J_m), Resistansi Motor (R), Induktansi Motor (L), dan *Viscous Friction Coefficient* (B_m).

Untuk pengambilan data motor DC menggunakan beberapa alat pendukung, yaitu DC *power supply*, amperemeter, penjepit, *tachometer* serta kabel. Berikut konfigurasi pengukuran motor DC.



Gambar 3.7 Konfigurasi Pengukuran Motor DC

- Konstanta Tegangan (K_e)
Untuk mendapatkan nilai konstanta tegangan (K_e) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$K_e \left[\frac{\text{Volt} \cdot \text{sec}}{\text{rad}} \right] = \frac{\text{Volts [V]}}{\text{Speed [rad/sec]}} \dots\dots\dots (3.1)$$

- Konstanta Torsi (K_t)
Untuk mendapatkan nilai konstanta torsi (K_t) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$K_t \left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}} \right] = \frac{K_e}{0,011927} \dots\dots\dots (3.2)$$

- Inersia Motor (J_m)
Untuk mendapatkan nilai inersia motor (J_m) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$J_m [\text{Nm} \cdot \text{sec}^2] = \frac{\text{akselerasi torsi}}{\text{akselerasi}} \dots\dots\dots (3.3)$$

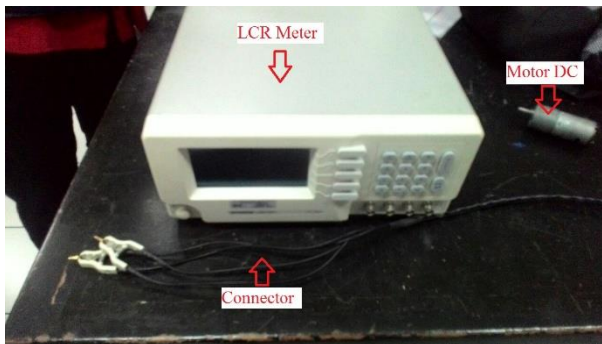
Dimana :

$$\text{Akselerasi (a)} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\text{Akselerasi torsi } (T_m) = \frac{(K_t \times I_{max}) - (K_t \times I_{min})}{J_m} \dots\dots\dots(3.5)$$

Dari pengukuran motor DC yang dilakukan, akan didapatkan nilai rpm , tegangan dan arus. Selanjutnya data tersebut diolah sesuai rumus untuk mencari beberapa nilai parameter motor DC.

- Resistansi Motor (R) dan Induktansi Motor (L)
Untuk mendapatkan nilai resistansi motor (R) dan induktansi motor (L) dengan cara menghubungkan kutub positif dan negative motor DC ke RLC meter. Kemudian dilakukan pengambilan data sebanyak 32 kali setelah itu di rata-rata.



Gambar 3.8 LCR meter

- Viscous Friction Coefficient (Bm)
Untuk mendapatkan Viscous Friction Coefficient (Bm) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T_m(t) \dots\dots\dots(3.6)$$

Dimana :

J_m = Inersia Motor (Nm.sec²)

B	= Viscous Friction (Nm.sec/rad)
ω	= Kecepatan Angular Motor DC (rad/sec)
Tm	= Torsi Motor (N.m)

Motor DC 12 V telah terhubung dengan gear box. Rasio gear box pada motor DC yaitu 1:482,1971. Dari persamaan (1) sampai (6) didapatkan nilai Konstanta Tegangan (Ke), Konstanta Torsi (Kt), Inersia Motor (Jm), Resistansi Motor (R), Induktansi Motor (L), dan *Viscous Friction Coefficient* (Bm) sebagai berikut ^[16].

Tabel 3.1 Parameter-parameter Motor DC

Parameter-Parameter Motor	Nilai Parameter Motor
Ke	17.801384 Volt.sec/rad
Kt	17.722976 Nm/A
R	6.3863 Ω
L	0,224245 Henry
Jm	0,016609 Nm.s ²
Bm	1,52055 Nm.sec/rad
Re _{min}	1,02 x 10 ⁻⁴ derajat
Re _{max}	4,03 derajat

3.3 Pemodelan Sistem Penjejak Matahari

3.3.1 Pemodelan Posisi Matahari

Posisi matahari di langit dapat ditentukan dengan dua parameter yaitu sudut *azimuth* dan sudut *altitude*. Kedua parameter tersebut merepresentasikan posisi matahari di langit. Pemodelan posisi matahari bergantung pada rumus sudut *azimuth* dan sudut

altitude serta beberapa faktor diantaranya posisi geografis dan interval waktu. Berikut ini adalah perhitungan sudut *altitude* (α):

$$\alpha = 90 - \theta_z \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360 (284 + n)}{365} \right) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\omega = \lambda + \phi \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\lambda = -\left(\frac{(12 - UTC)}{24} \right) 360 \dots\dots\dots (3.11)$$

Sedangkan sudut *azimuth* (β) dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini.

$$\beta = \mu_{ew} \mu_{ns} \beta_{so} + ((1 - \mu_{ew} \mu_{ns}) / 2) \mu_w \dots\dots\dots (3.12)$$

$$\beta_{so} = \sin^{-1} (\sin \omega \cos \delta / \sin \theta_z) \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\mu_{ew} = \begin{cases} 1, & |\omega| < \eta_{ew} \\ -1, & |\omega| \geq \eta_{ew} \end{cases} \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\eta_{ew} = \cos^{-1} (\cot \phi \tan \delta) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\mu_{ns} = \begin{cases} 1, & \phi(\phi - \delta) \geq 0 \\ -1, & \phi(\phi - \delta) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3.16)$$

Dengan n adalah nomor hari dalam setahun (misal 1 Januari (n=1), 31 Desember (n=365)), ω adalah sudut jam dan UTC adalah

Universal Time Conversion, θ_z adalah sudut *zenith* , δ adalah sudut deklinasi, ϕ adalah posisi lintang, serta λ adalah sudut konversi.

Model posisi matahari dapat disimulasikan menggunakan MATLAB simulink seperti yang tertera pada lampiran ,dengan input model yaitu waktu setempat, posisi lintang dan bujur pada titik pengamatan^[10].

3.3.2 Pemodelan Motor DC

Pemodelan motor DC dilakukan untuk merepresentasikan karakteristik dari motor DC. Motor DC memiliki 2 prinsip kerja yaitu secara elektrik dan mekanik. Secara elektrik, motor DC menggunakan Hukum Tegangan Kirchoff II sedangkan secara mekanik, motor DC menggunakan Hukum II Newton (rotasi). Pemodelan motor DC menggunakan 5 parameter yang telah didapatkan secara *experiment*.

Pemodelan dinamik dari motor DC dapat direpresentasikan melalui persamaan berikut:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (E(t) - R i(t) - K_{\omega} \omega(t)) \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} (K_m i(t) - T_L(t) - B \omega(t)) \dots\dots\dots (3.18)$$

dengan $i(t)$ adalah arus keluaran dari motor DC, L adalah induktansi motor DC, $E(t)$ adalah tegangan masukan dari motor DC, R adalah resistansi dari motor DC, K_{ω} adalah konstanta tegangan, $\omega(t)$ adalah kecepatan putaran motor, J adalah momen inersia, K_m adalah konstanta torsi motor, serta T_L adalah beban torsi, B adalah koefisien friksi.

Dari persamaan (3.17) dan (3.18), dapat digambarkan ke dalam model Matlab/Simulink untuk Motor DC yang dapat dilihat pada lampiran ^[10].

3.3.3 Pemodelan Sensor LDR

Sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) merupakan sensor yang dibuat dari *cadmium sulfida* (CdS). Sensor LDR dapat mengubah intensitas cahaya menjadi nilai tegangan.

Keluaran dari sensor LDR berupa tegangan yang dibutuhkan sebagai masukan untuk kontroler. Rangkaian sensor LDR terhubung secara seri dengan resistansi sebesar 1000 Ω ketika akan digunakan sebagai sensor sistem penjejak matahari.

Hubungan masukan dan keluaran sensor LDR dapat dituliskan dengan persamaan 3.19 berikut ini:

$$\text{Log } R = -3/4 \text{ Log } I + 5 \dots\dots\dots (3.19)$$

Sedangkan intensitas matahari selama pukul 05.30 hingga pukul 17.30 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{max}} \sin \theta \dots\dots\dots (3.20)$$

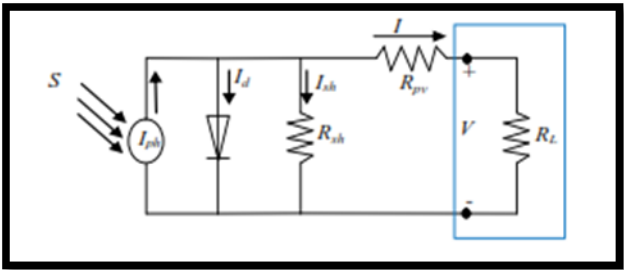
Dengan I_{max} merupakan intensitas matahari yang diterima tiap LDR yang dapat diperoleh melalui eksperimen.

Berdasarkan persamaan di atas, sensor LDR dapat dimodelkan melalui Matlab simulink yang dapat dilihat pada lampiran. LDR timur dan barat digunakan untuk menjejak posisi *azimuth* dari matahari. Sedangkan LDR utara dan selatan digunakan untuk menjejak posisi *altitude* dari matahari ^[10].

3.3.4 Pemodelan Panel Surya

Terdapat 2 model yang biasanya digunakan untuk simulasi dan evaluasi panel surya yaitu model *single diode* dan *double-diode*. Pada penelitian ini, panel surya digambarkan sebagai rangkaian ekuivalen dioda seperti gambar 3.9. Model *single diode* memiliki 4

komponen yaitu sumber arus cahaya, dioda yang disusun paralel dengan sumber, resistansi internal panel surya serta resistor *shunt*.



Gambar 3.9 Rangkaian Ekuivalen PV^[10]

Dalam simulasi, data radiasi serta suhu diperoleh dari eksperimen dan akan disajikan dalam bentuk *lookup table* pada SIMULINK/Matlab. Pada model *fixed* PV terdapat empat input variabel yaitu *altitude*, *azimuth*, *pitch* dan *yaw angle* . Untuk sudut *pitch* dan *yaw* diatur tetap (statis).

Arus beban I dapat dihitung menurut hukum Kirchoff tentang arus,

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \dots\dots\dots (3.21)$$

Secara ideal $I_{sh} = 0$ agar $R_{sh} = \infty$, oleh karena itu persamaan 21 dapat ditulis

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_o \left[\exp \frac{V + IR_{pv}}{V_t} - 1 \right] \dots\dots\dots (3.22)$$

Dalam bentuk yang lain, I dan V dapat direpresentasikan sebagai fungsi radiasi dan temperatur seperti persamaan 3.23 dan 3.24.

$$I = \left[\left(\frac{S}{S_{ref}} \right) (\mu(T - T_{ref}) + 1) - I_{sc} \right] + I_n \dots\dots\dots (3.23)$$

$$V = V_n - \phi(T - T_{ref}) - R_{pv} (I - I_n) \dots\dots\dots (3.24)$$

Beberapa parameter seperti μ , \emptyset , I_{sc} , V_{oc} tersedia pada tabel 3.2. Sedangkan nilai $S_{reg} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ (298K), sementara R_{pv} didapatkan dari perhitungan persamaan 24 ^[10].

Tabel 3.2 Parameter Panel Surya

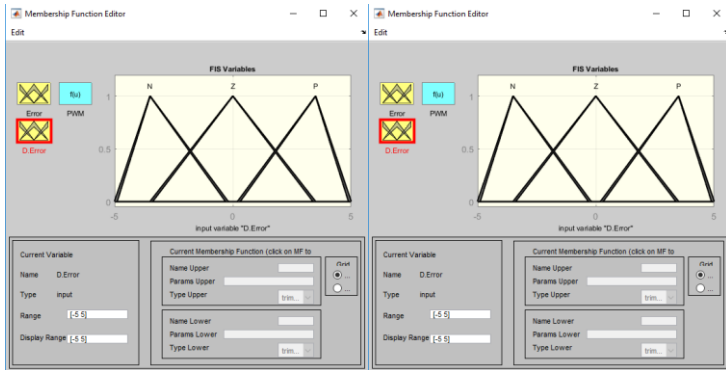
Parameters	Quantities
Short Circuit Current (I_{sc})	1,25 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	21,5 V
Temperature Coefficient Of Short Circuit Current (μ)	0,0005 A/ $^\circ\text{C}$
Temperature Coefficient Of Open Circuit Voltage (\emptyset)	-0,0036 V/ $^\circ\text{C}$
Reference Voltage (V_n)	17,2 V
Reference Current (I_n)	1,16 A
Maximum Power at STC	20 W
PV Internal Resistance R_{pv}	1,11 Ω

3.3.5 Pemodelan *Controller*

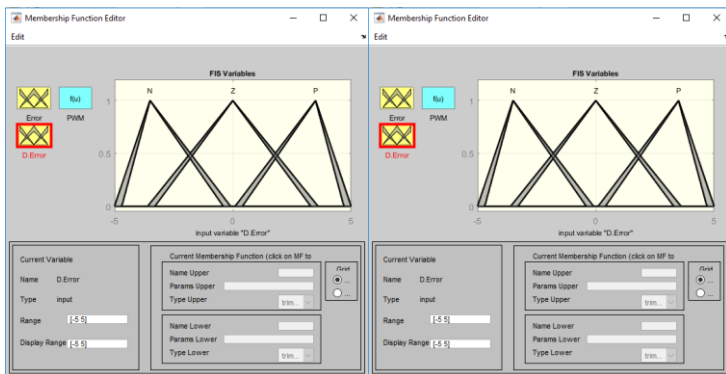
Pada sistem penjejak matahari akan digunakan metode kontrol fuzzy tipe 2 interval. Dengan membandingkan bentuk dari fungsi keanggotaan fuzzy, jumlah fungsi keanggotaan serta nilai dari *footprint of uncertainty* (FOU).

- Fungsi keanggotaan segitiga dengan jumlah 3 fungsi keanggotaan (membership function/MF)

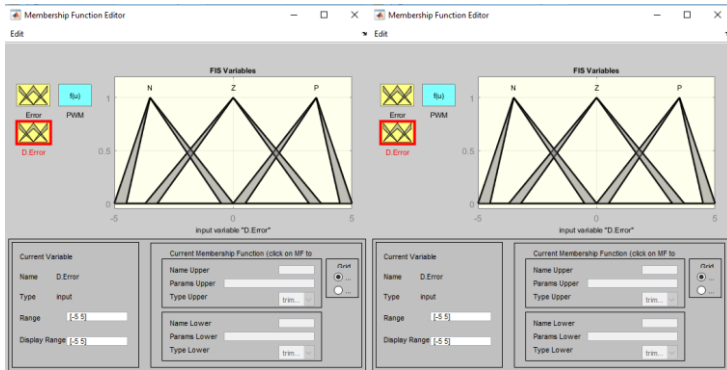
Untuk fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga akan digunakan variasi $FOU \pm 0.1$, ± 0.3 dan ± 0.5 . Fungsi ini akan digunakan untuk mengendalikan sudut *pitch* dan *yaw* dari motor DC *pitch* dan *yaw*. Dengan input yaitu error dan delta error tegangan dari sensor LDR serta output berupa PWM. Berikut ini merupakan input serta fuzzifikasi dari error dan delta error tegangan dari sensor LDR.



Gambar 3.10 3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR ($FOU \pm 0.1$)

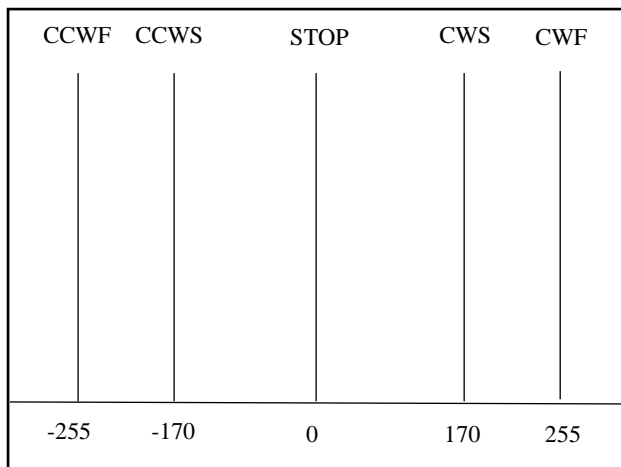


Gambar 3.11 3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR ($FOU \pm 0.3$)



Gambar 3.12 3MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU ± 0.5)

Output atau defuzzifikasi yang digunakan dalam sistem ini yaitu PWM motor DC 8 bit yang mempunyai *range* -255 sampai 255. Defuzzifikasi tersebut digunakan untuk sudut *pitch* dan *yaw*. Nilai minus (-) pada parameter hanya mengindikasikan arah putaran motor DC.



Gambar 3.13 Defuzzifikasi 3MF PWM motor DC

Tabel 3.3 Defuzzifikasi 3MF (Input)

Nama MF	Parameter
CW Fast	255
CW Slow	170
STOP	0
CCW Slow	-170
CCW Fast	-255

Rule base yang digunakan untuk 3 MF segitiga berjumlah 9. Berikut ini adalah rule base dari 3 MF segitiga pitch dan yaw.

Tabel 3.4 Rule Base 3MF *Pitch*

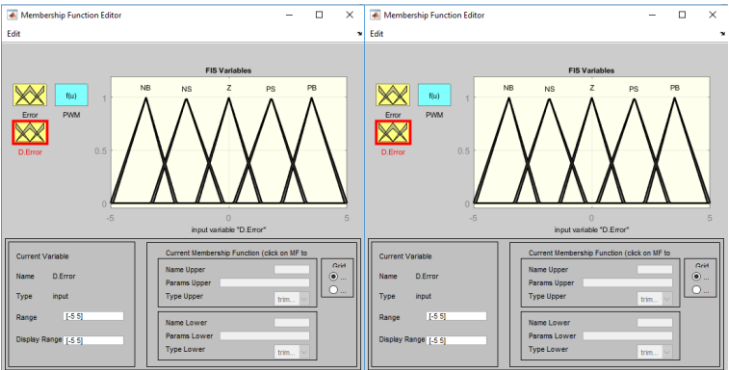
Δe \ e	N	Z	P
N	CCWF	Stop	CWF
Z	CCWS	Stop	CWS
P	CCWF	Stop	CWF

Tabel 3.5 Rule Base 3MF *Yaw*

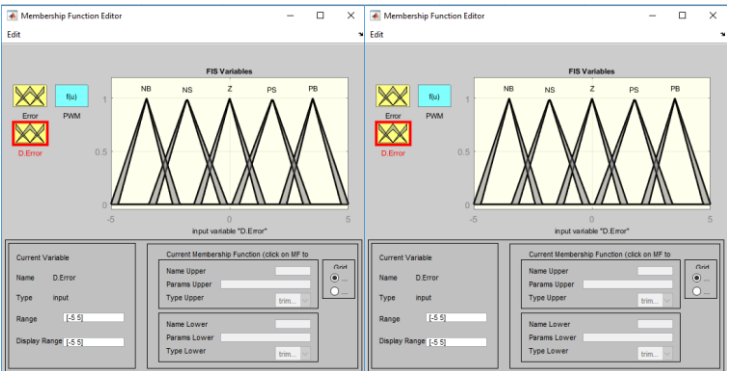
Δe \ e	N	Z	P
N	CWF	Stop	CCWF
Z	CWS	Stop	CCWS
P	CWF	Stop	CCWF

- Fungsi keanggotaan segitiga dengan jumlah 5 fungsi keanggotaan(membership function/MF)

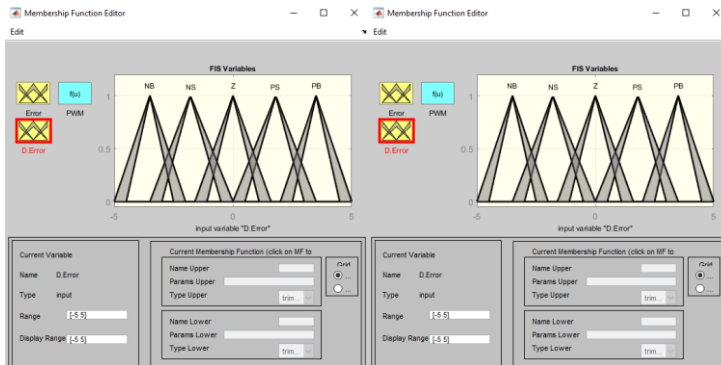
Untuk fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga akan digunakan variasi FOU ± 0.1 , ± 0.3 dan ± 0.5 . Fungsi ini akan digunakan untuk mengendalikan sudut pitch dan yaw dari motor DC pitch dan yaw. Dengan input yaitu error dan delta error tegangan dari sensor LDR serta output berupa PWM. Berikut ini merupakan input serta fuzzifikasi dari error dan delta error tegangan dari sensor LDR.



Gambar 3.14 5MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU ± 0.1)

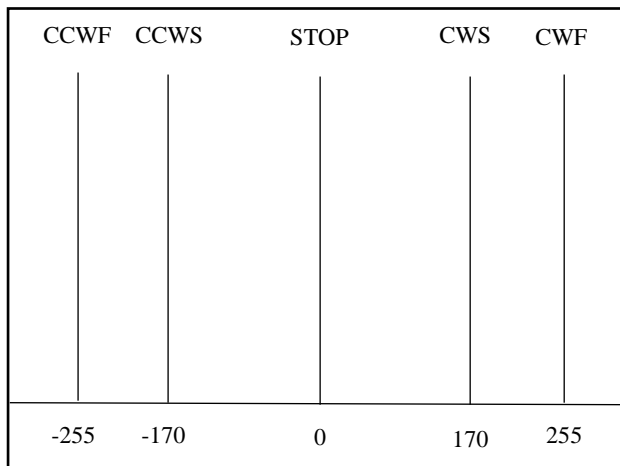


Gambar 3.15 5 MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU ± 0.3)



Gambar 3.16 5 MF Input Error dan Delta Error Tegangan LDR (FOU ± 0.5)

Output atau defuzzifikasi yang digunakan dalam sistem ini yaitu PWM motor DC 8 bit yang mempunyai *range* -255 sampai 255. Defuzzifikasi tersebut digunakan untuk sudut *pitch* dan *yaw*. Nilai minus (-) pada parameter hanya mengindikasikan arah putaran motor DC.



Gambar 3.17 Defuzzifikasi 5MF PWM motor DC

Tabel 3.6 Defuzzifikasi 5MF (Input)

Nama MF	Parameter
CW Fast	255
CW Slow	170
STOP	0
CCW Slow	-170
CCW Fast	-255

Rule base yang digunakan untuk 5MF berjumlah 25. Berikut ini adalah rule base pitch dan yaw.

Tabel 3.7 Rule Base 5 MF Pitch

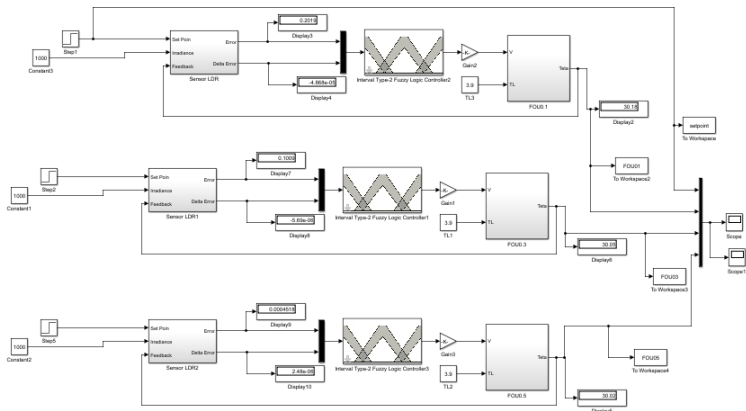
$\begin{matrix} e \\ \Delta e \end{matrix}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	CCWFast	CCWFast	Stop	CWSlow	CWFast
NS	CCWFast	CCWSlow	Stop	CWSlow	CWSlow
ZE	CCWSlow	CCWSlow	Stop	CWSlow	CWSlow
PS	CCWSlow	CCWSlow	Stop	CWSlow	CWFast
PB	CCWFast	CWSlow	Stop	CWFast	CWFast

Tabel 3.8 Rule Base 5 MF Yaw

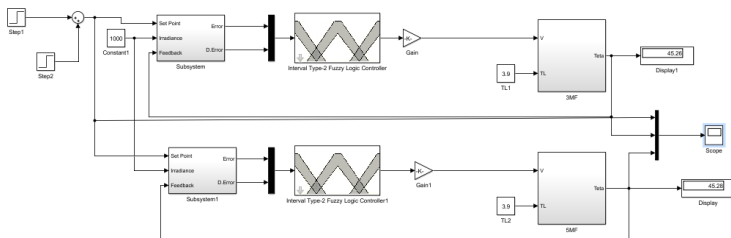
$\begin{matrix} e \\ \Delta e \end{matrix}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	CWFast	CWFast	Stop	CCWSlow	CCWFast
NS	CWFast	CWSlow	Stop	CCSlow	CCWSlow
ZE	CWSlow	CWSlow	Stop	CCWSlow	CCWSlow
PS	CWSlow	CWSlow	Stop	CCWSlow	CCWFast
PB	CWFast	CCWSlow	Stop	CCWFast	CCWFast

3.4 Target Pencapaian Sistem Penjejak Matahari

Pada uraian sebelumnya telah dijelaskan bahwa sistem penjejak matahari adalah sebuah sistem yang digunakan untuk mengendalikan orientasi panel surya agar tegak lurus terhadap posisi matahari. Hal ini dilakukan bertujuan agar penyerapan energi surya oleh panel surya mengalami peningkatan. Untuk mewujudkan sistem ini, diperlukan pengujian kualitas kontrol yang digunakan dengan menerapkan uji *set point* serta uji *tracking*. Kedua pengujian ini dilakukan untuk melihat performa kontrol yang telah dirancang. Berikut ini adalah rancangan uji *set point* serta uji *tracking* yang dilakukan dalam Matlab/Simulink.



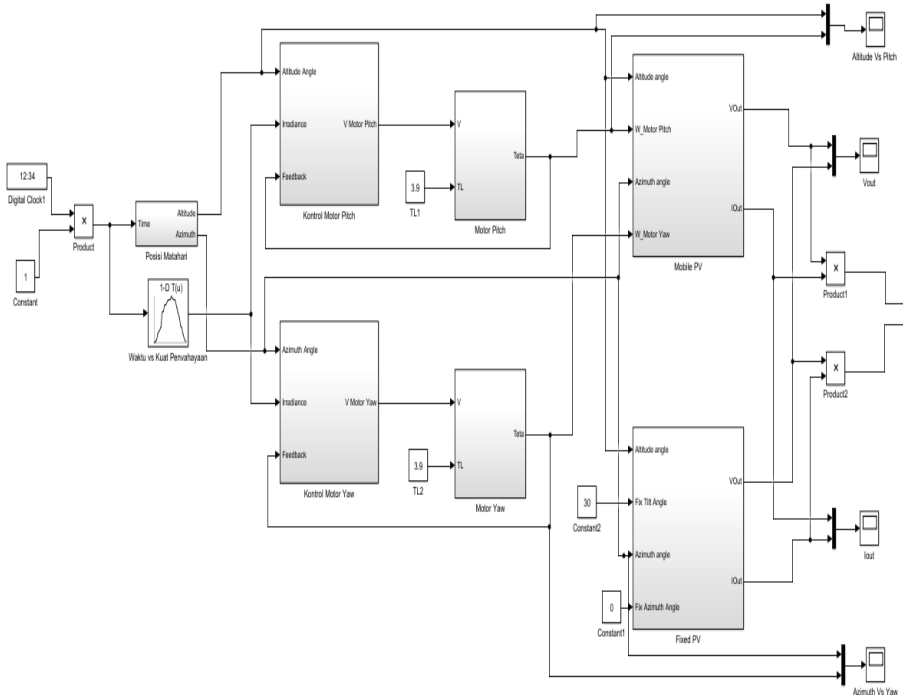
Gambar 3.18 Rangkaian MATLAB/SIMULINK Uji *Set Point*



Gambar 3.19 Rangkaian MATLAB/SIMULINK Uji *Tracking*

Acuan dari hasil performansi kontrol yang diuji adalah pada penelitian sebelumnya yang menghasilkan *settling time* 6 s [5]. Hasil tersebut dijadikan acuan karena memiliki *settling time* yang cepat. Hal ini sangat dibutuhkan oleh sistem penjejak matahari yang memerlukan kecepatan dalam menjejak matahari untuk memaksimalkan penyerapan energi surya.

Setelah dilakukan pengujian performansi kontrol, maka tahap selanjutnya adalah perancangan sistem penjejak matahari dua sumbu secara lengkap yang bertujuan untuk mengetahui performansi PV. Acuan dari performansi PV berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu sebesar 48,56 persen [5]. Gambar 3.20 merupakan rangkaian sistem penjejak matahari aktif dua sumbu.



Gambar 3.20 Rangkaian MATLAB/SIMULINK Sistem Penjejak Matahari Aktif Dua Sumbu

BAB IV

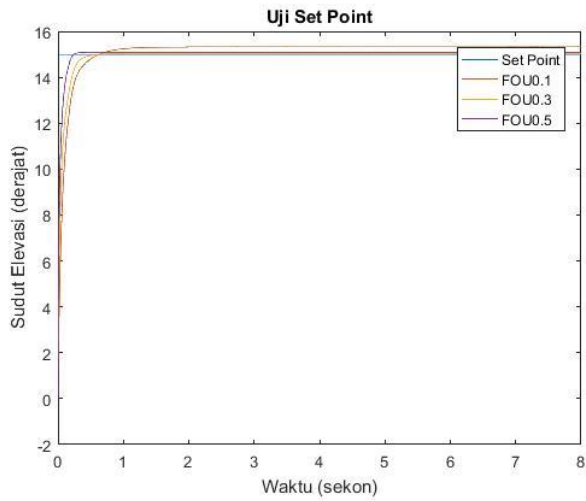
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada perancangan sistem penjejak matahari, variabel yang dikendalikan yaitu sudut *pitch* dan *yaw* motor serta keluaran tegangan pada LDR. Keluaran tegangan pada LDR dipantau karena tegangan keluaran LDR merepresentasikan sudut *altitude* dan *azimuth* matahari yang diterima oleh masing-masing LDR. Pada penelitian ini, perancangan sistem penjejak matahari menggunakan metode kontrol fuzzy tipe-2 interval. Metode kontrol fuzzy tipe-2 (KFT2) interval menggunakan variasi *footprint of uncertainty* (FOU) untuk mengetahui respon yang dihasilkan oleh sistem. Selain itu akan digunakan variasi bentuk serta jumlah *membership function* (MF) untuk mengetahui respon terbaik yang dihasilkan. Kemudian dari hasil respon terbaik akan digunakan dalam simulasi sistem penjejak matahari.

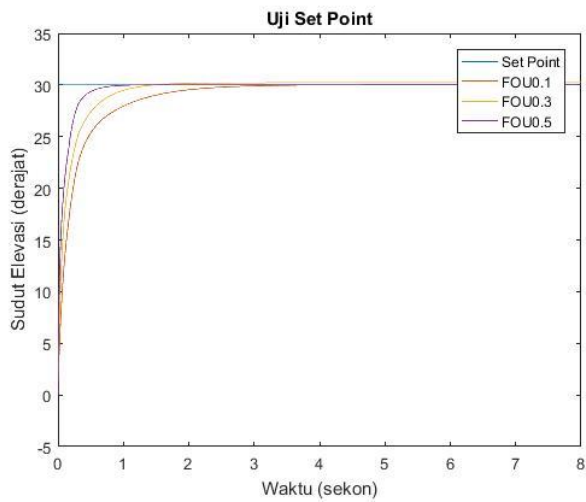
Untuk menguji kontrol yang diterapkan pada sistem penjejak matahari terdapat beberapa metode uji yaitu uji *set point* dengan uji *tracking* untuk mengetahui keterkendalian dari perancangan dan pemodelan dari sistem penjejak matahari. Pada sub bab berikut ini akan ditampilkan hasil uji *set point* maupun uji *tracking*.

4.1 Uji Set Point KFT2 Menggunakan 3 Membership Function

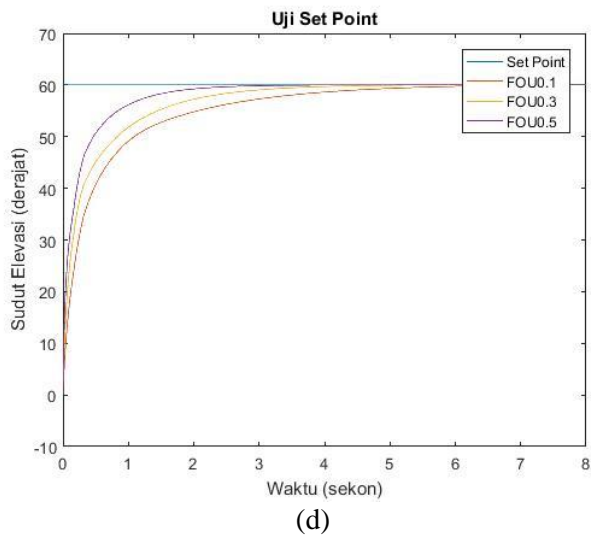
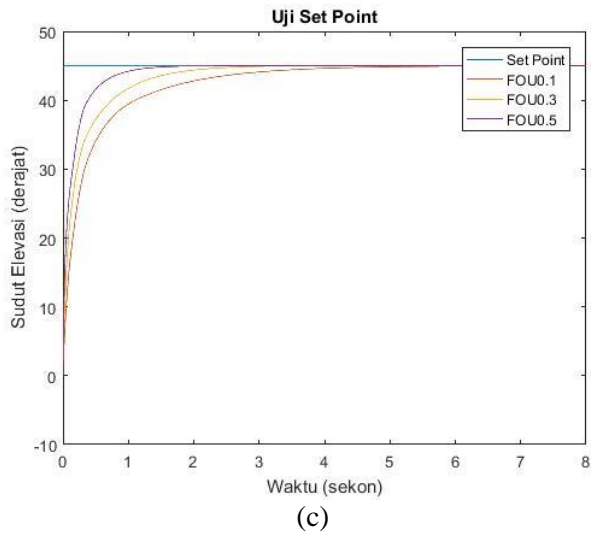
Pada uji *set point* sudut, diujikan 4 *set point* sudut elevasi matahari dan 4 *set point* sudut *azimuth* matahari dengan masing – masing sudut memiliki fungsi keanggotaan 3 buah. Untuk sudut elevasi matahari menggunakan *set point* sudut 15^0 , 30^0 , 45^0 serta 60^0 sedangkan untuk sudut azimuth matahari menggunakan *set point* yang sama sudut 15^0 , 30^0 , 45^0 serta 60^0 . Berikut ini adalah grafik respon sudut *pitch* untuk 3MF.



(a)



(b)



Gambar 4.1 Respon Sudut *Pitch* 3MF dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

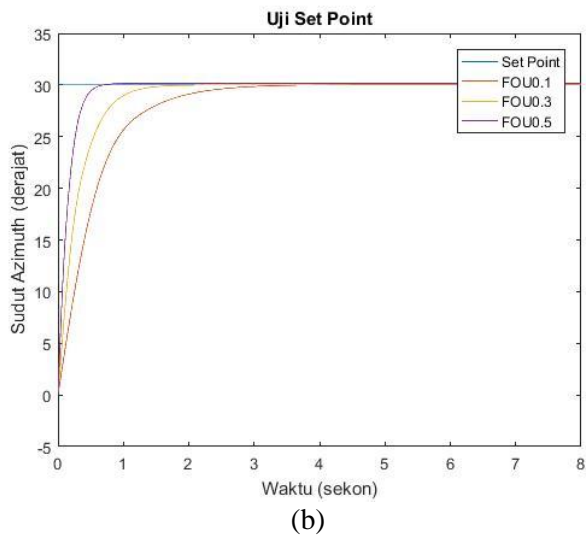
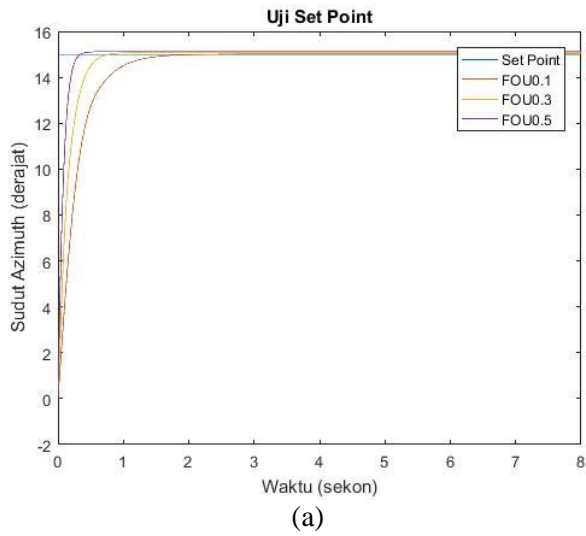
Berdasarkan gambar 4.1 dapat diperoleh indeks performansi respon, yaitu :

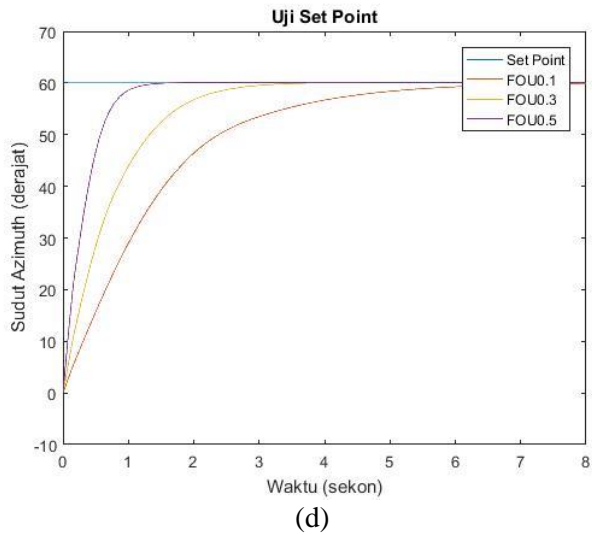
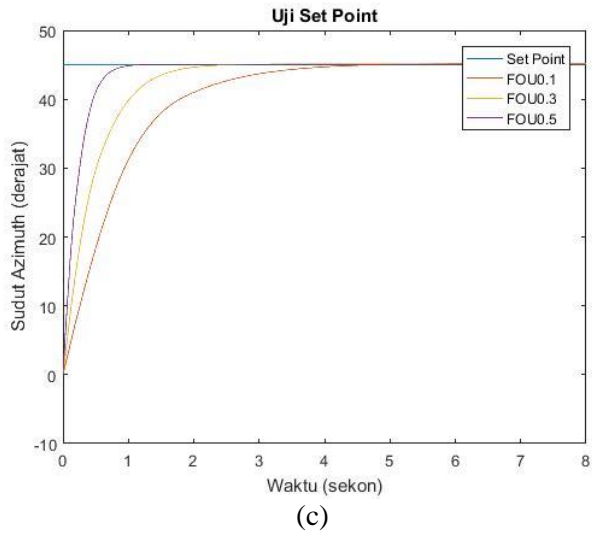
Tabel 4.1 Perbandingan Indeks Performansi Sudut *Pitch* 3MF

Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty											
	± 0.1				± 0.3				± 0.5			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,27	0,47	1,1	1,5	0,18	0,49	0,81	1,21	0,15	0,28	0,47	0,68
Ts (s)	0,64	1,48	5,6	7,6	0,57	1,5	2,25	4,97	0,39	1,03	1,5	3,4
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	2.11	0,51	0,12	0,09	0,22	0,71	0,11	0,14	0,57	0,06	0,05	0,04

Profil dan perhitungan respon sudut *pitch* memperlihatkan bahwa KFT2 yang menggunakan FOU $\pm 0,5$ sangat cepat untuk mencapai *set point* dan keadaan *steady*. Kondisi ini dapat dilihat dari gradien *slope* respon kontrolnya yang lebih besar daripada FOU $\pm 0,3$ serta $\pm 0,1$. Dari tabel 4.1 indeks performansi juga teridentifikasi bahwa KTF2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ memiliki selisih waktu yang meningkat secara linier terhadap kenaikan *set point*. Error sudut rata – rata yang dihasilkan KFT2 yang menggunakan FOU $\pm 0,5$ untuk tiap *set point* sudut elevasi sebesar 0.4 derajat atau 0.18 persen. Persentase *error* tersebut merupakan hasil terbaik jika dibandingkan dengan KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,3$ atau $\pm 0,1$ yang memiliki *error* lebih besar. Berdasarkan hasil tersebut, KFT2 yang menggunakan FOU $\pm 0,5$ dalam hal ini tidak mengalami osilasi, sehingga dapat diartikan bahwa kontrol dapat mengarahkan orientasi putaran tepat mengikuti *set point* yang ditentukan.

Grafik respon sudut yaw 3MF dengan *set point* 15⁰, 30⁰, 45⁰ serta 60⁰ dapat dilihat pada gambar 4.2.





Gambar 4.2 Respon Sudut Yaw 3MF dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

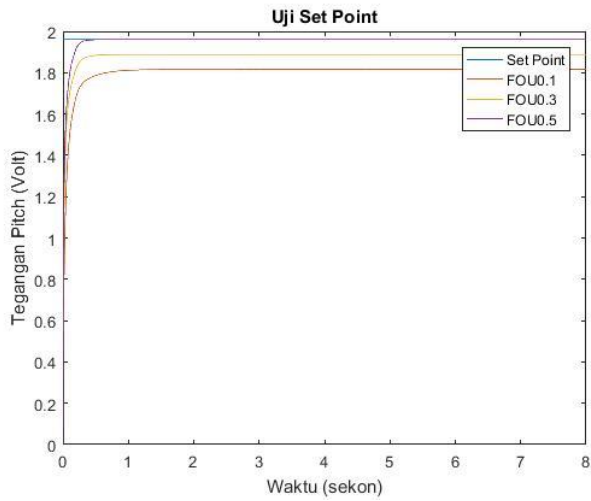
Indeks performansi kontrol dari gambar 4.2 dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Indeks Performansi Sudut Yaw 3MF

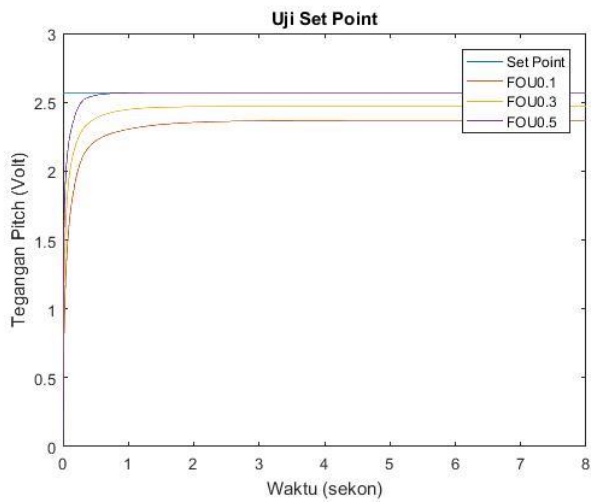
Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty											
	± 0.1				± 0.3				± 0.5			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,58	1,13	1,77	2,88	0,33	0,64	0,96	1,44	0,163	0,31	0,44	0,58
Ts (s)	1,69	3,36	4,57	8,22	0,71	1,79	2,36	3,52	0,34	0,65	1,02	1,33
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,02	0,14	0,49	0,03	0,58	0,02	0,29	0,22	0,76	0,55	0,19	0,19

Gambar 4.2 dan tabel 4.2 menunjukkan bahwa KFT2 yang menerapkan FOU $\pm 0,5$ memiliki respon yang sangat cepat. Keadaan ini dapat ditinjau dari kemiringan respon kontrol, FOU $\pm 0,5$ memiliki kemiringan yang lebih besar daripada FOU $\pm 0,3$ dan $\pm 0,1$. Pada pengujian tersebut dihasilkan *error* sudut rata-rata dari KFT2 yang menerapkan FOU $\pm 0,5$ adalah sebesar 0.12 derajat atau 0.42 persen. Kemampuan KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ untuk mencapai *set point* dan keadaan tunak tanpa mengalami osilasi menunjukkan bahwa kontrol dapat menyesuaikan dan mengikuti nilai *input* dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ konsisten menjaga kestabilan respon untuk tiap *set point* sudut *azimuth* yang dimasukkan ke dalam sistem.

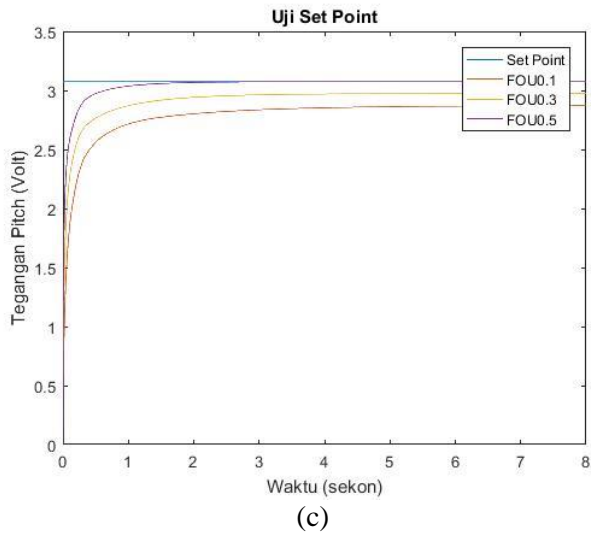
Pada uji *set point* tegangan keluaran LDR, digunakan 3 *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut elevasi matahari dan 3 *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut *azimuth* matahari dengan masing – masing memiliki fungsi keanggotaan 3 buah. Untuk *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut elevasi matahari 15^0 , 30^0 serta 60^0 berturut-turut adalah 1,91V, 2,57V dan 3,07V, sedangkan untuk *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut *azimuth* matahari 15^0 , 30^0 serta 60^0 berturut-turut adalah 3,17V, 3,07V dan 2,57V. Gambar 4.3 dan 4.4 merupakan grafik respon tegangan keluaran LDR untuk 3MF.



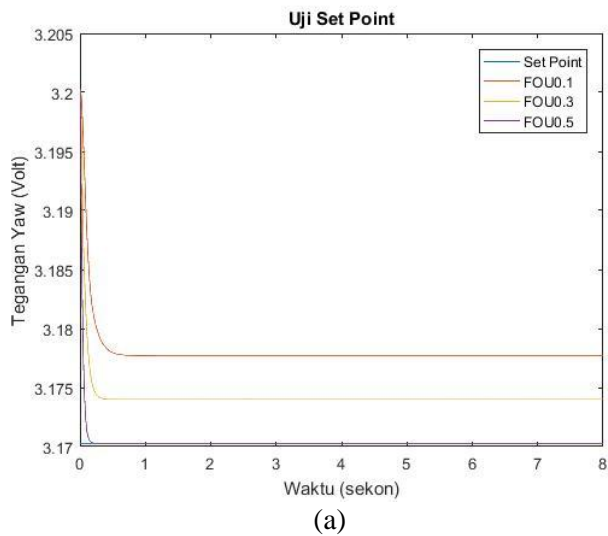
(a)

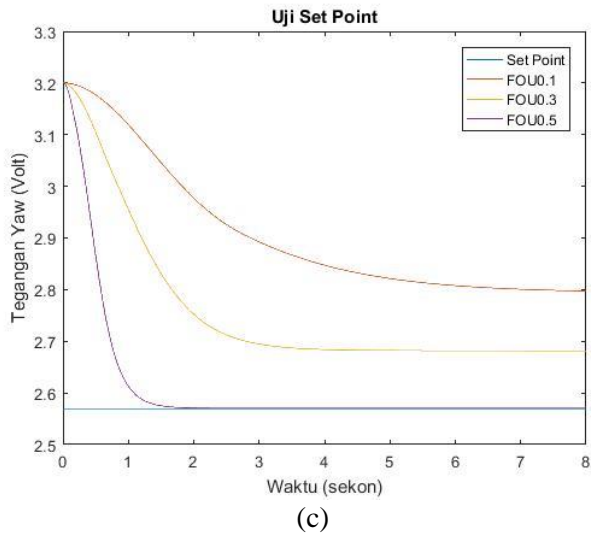
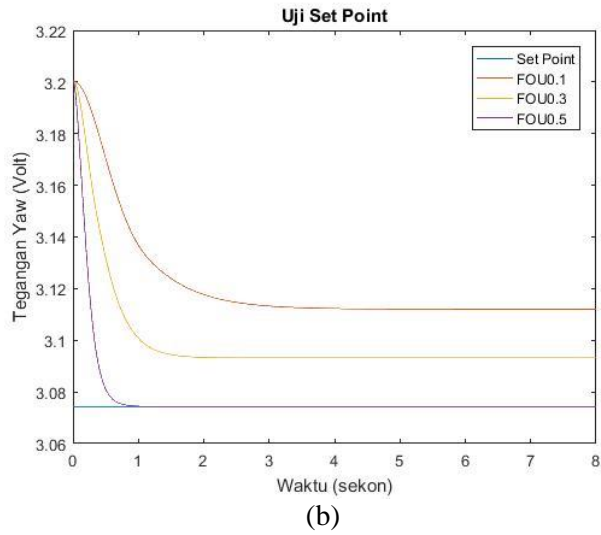


(b)



Gambar 4.3 Respon Tegangan *Pitch* 3MF dengan *Set Point* (a) 1,91V
(b) 2,57V (c) 3,07V





Gambar 4.4 Respon Tegangan Yaw 3MF dengan *Set Point* (a) 3,17V
(b) 3,07V (c) 2,57V

Berdasarkan gambar 4.3 dan 4.4 didapatkan indeks performansi kontrol, yaitu :

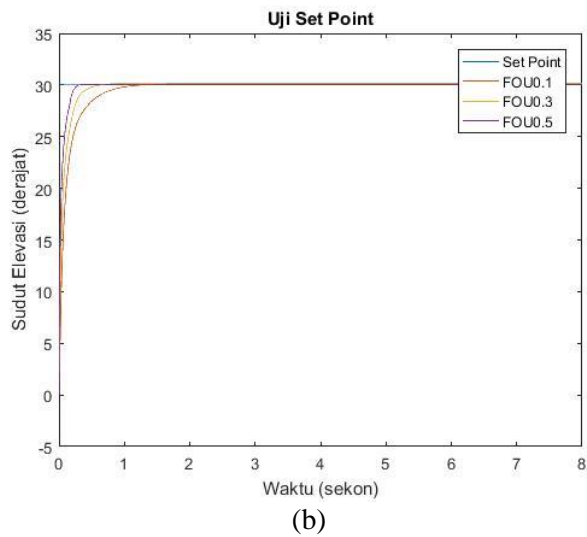
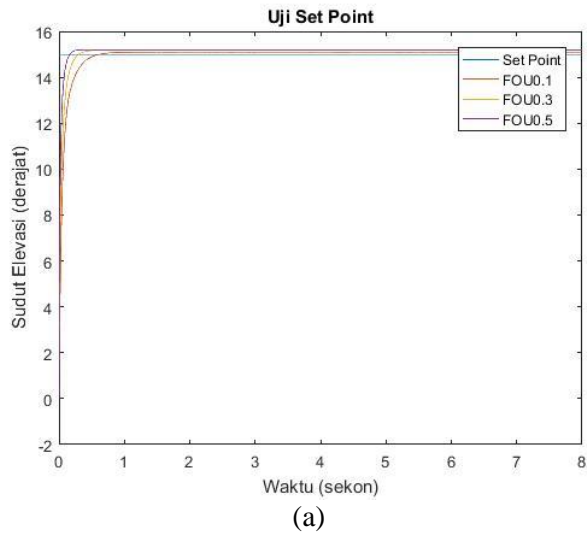
Tabel 4.3 Indeks Performansi Tegangan *Pitch* dan *Yaw* 3MF

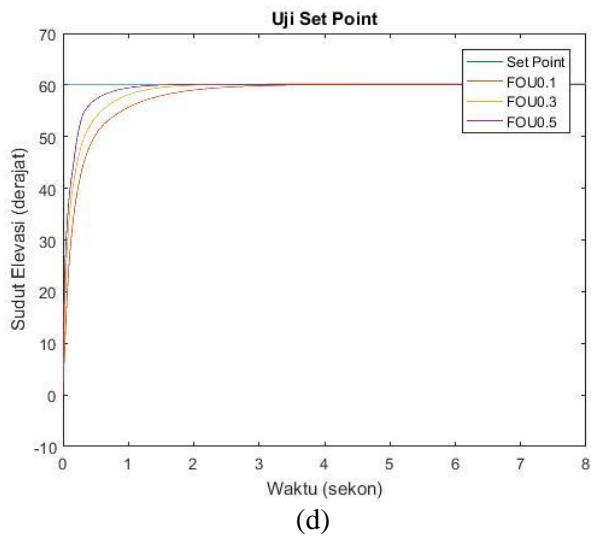
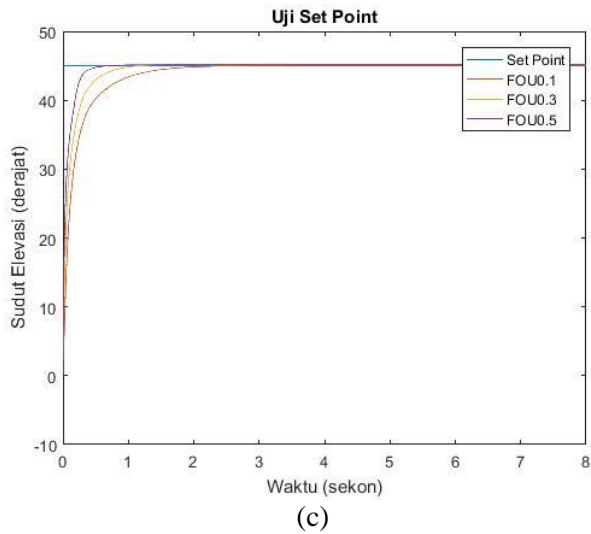
Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty					
	± 0.5 (<i>pitch</i>)			± 0.5 (<i>yaw</i>)		
	1,96V	2,57V	3,07V	3,17V	3,07V	2,57V
Tr (s)	0,125	0,213	0,4	0,246	0,433	0,925
Ts (s)	0,354	0,64	1,203	0,425	0,804	1,606
MOS %	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,023	0,019	0,015	0	0,002	0,019

Profil respon uji tegangan *pitch* dan *yaw* LDR memperlihatkan bahwa FOU $\pm 0,5$ dapat mencapai *set point* dan keadaan *steady*, sedangkan untuk FOU $\pm 0,3$ serta $\pm 0,1$ tidak dapat mencapai *set point*. Hal ini berarti bahwa KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ memiliki respon yang baik dan stabil dibandingkan FOU $\pm 0,3$ dan $\pm 0,1$. Kapabilitas KFT2 yang menggunakan FOU $\pm 0,5$ dalam menyesuaikan dan mengikuti *set point* sangat diperlukan untuk menjejak dinamika posisi matahari dalam periode penyinaran. Karakteristik tersebut harus dimiliki agar energi yang diserap maksimum sehingga efisiensi yang ditargetkan tercapai. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari serangkaian pengujian, *controller* 3MF dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ dapat dijadikan metode kontrol *solar tracker*.

4.2 Uji *Set Point* KFT2 Menggunakan 5 *Membership Function*

Pada uji *set point* digunakan 4 *set point* sudut elevasi matahari dan 4 *set point* sudut azimuth matahari dengan masing – masing sudut memiliki fungsi keanggotaan 5 buah. Untuk sudut elevasi matahari menggunakan *set point* sudut 15^0 , 30^0 , 45^0 serta 60^0 , sedangkan untuk sudut azimuth matahari menggunakan *set point* yang sama sudut 15^0 , 30^0 , 45^0 serta 60^0 . Grafik respon sudut *pitch* untuk 5MF tersedia pada gambar 4.5.





Gambar 4.5 Respon Sudut *Pitch* 5MF dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

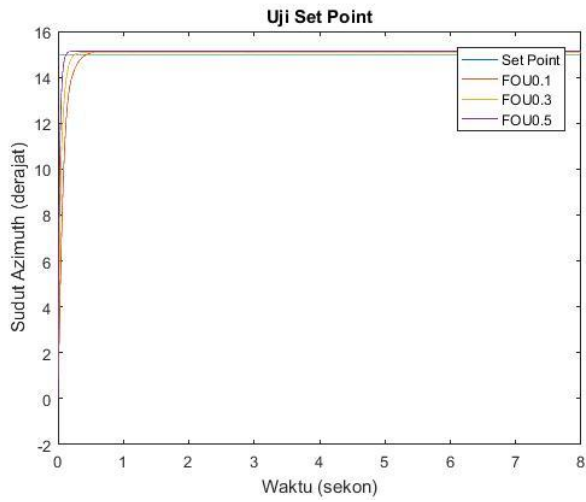
Indeks performansi dari respon sudut *pitch* pada gambar 4.5 dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan Indeks Performansi Sudut *Pitch* 5MF

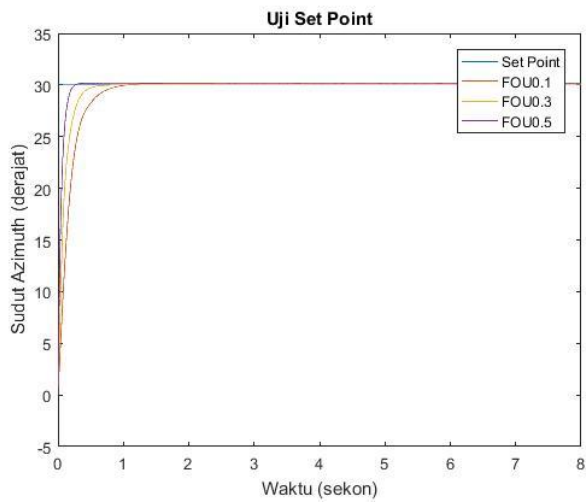
Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty											
	± 0.1				± 0.3				± 0.5			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,17	0,31	0,49	0,73	0,11	0,21	0,34	0,53	0,063	0,12	0,21	0,4
Ts (s)	0,54	1,16	2,2	3,14	0,28	0,65	1,09	1,65	0,15	0,44	0,78	1,28
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,3	0,43	0,05	0,03	1,2	0,62	0,54	0,37	1,3	0,31	0,31	0,29

Berdasarkan grafik respon sudut *pitch* 5 MF memperlihatkan bahwa KFT2 yang menerapkan FOU $\pm 0,5$ memiliki respon yang baik dan tercepat. Hal ini ditunjukkan dari besarnya kemiringan *slope* yang dimiliki FOU $\pm 0,5$ daripada FOU $\pm 0,3$ dan $\pm 0,1$. Kecepatan respon FOU $\pm 0,5$ juga ditunjukkan berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.4. Pada tabel 4.4 terlihat bahwa indeks performansi FOU $\pm 0,5$ dominan tercepat dalam merespon nilai *input* yang diberikan. Selisih waktu antara FOU $\pm 0,5$ dengan FOU $\pm 0,3$ serta $\pm 0,1$ untuk mencapai *set point* serta keadaan *steady*, meningkat signifikan untuk tiap kenaikan *set point*. Hal ini menunjukkan bahwa KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ stabil dalam mengikuti peningkatan *set point*. Pada pengujian ini dihasilkan *error* sudut rata-rata dari KFT2 dengan FOU $\pm 0,5$ sebesar 0,135 derajat atau 0,55 persen. Hasil tersebut menandakan bahwa KFT2 dengan FOU $\pm 0,5$ dapat mengikuti dan merespon setiap nilai masukan dalam sistem.

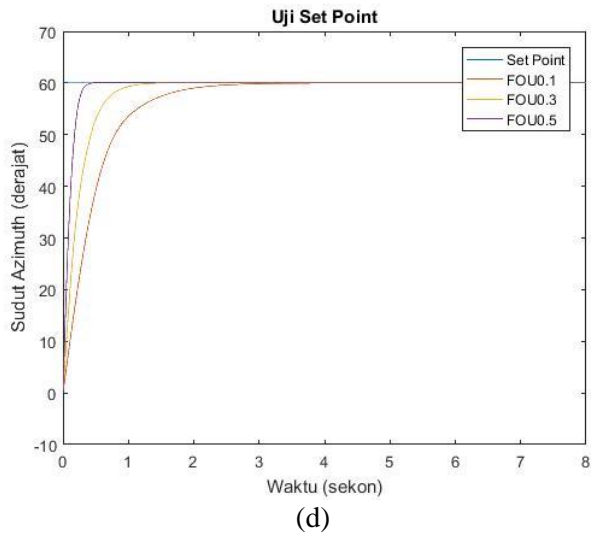
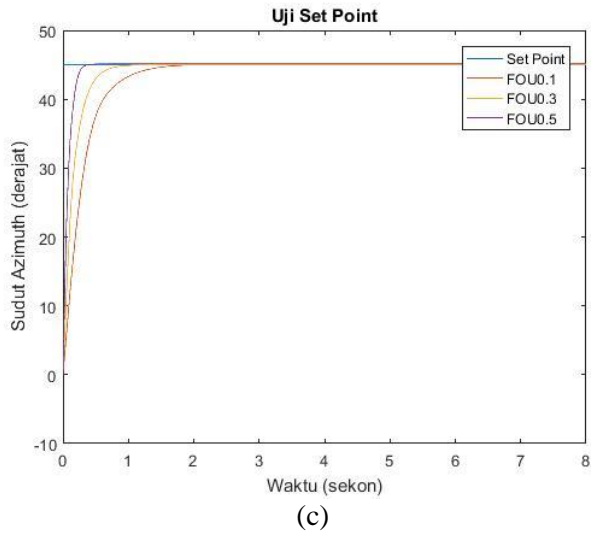
Grafik respon sudut *yaw* 5MF dengan *set point* 15⁰, 30⁰, 45⁰ dan 60⁰ dapat dilihat pada gambar 4.6.



(a)



(b)



Gambar 4.6 Respon Sudut Yaw 5MF dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

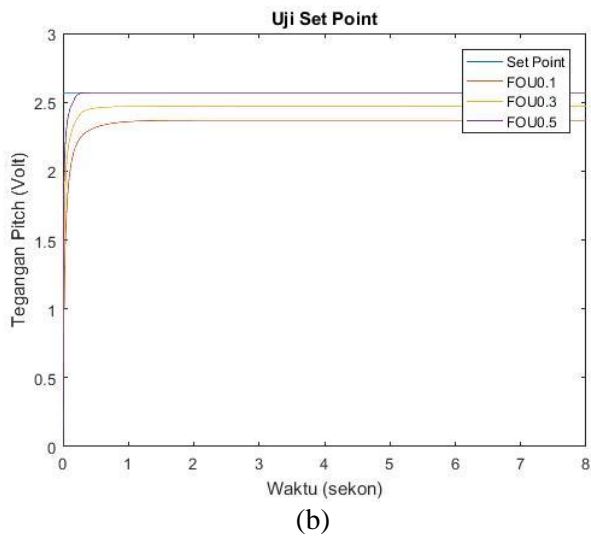
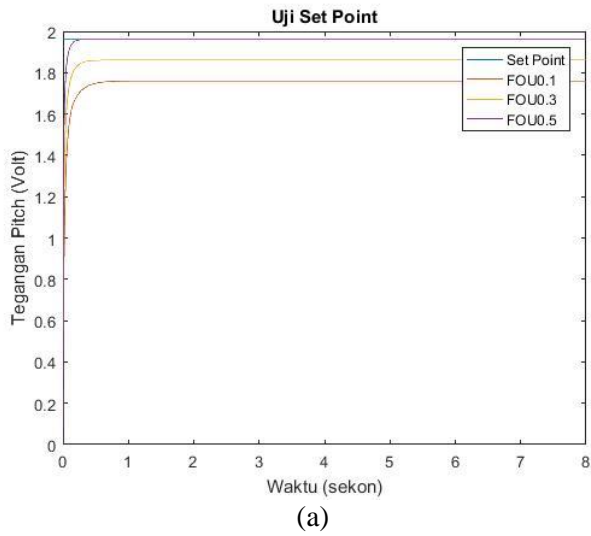
Berdasarkan profil respon sudut *yaw* pada gambar 4.6 didapatkan indeks performansi dari respon, yaitu :

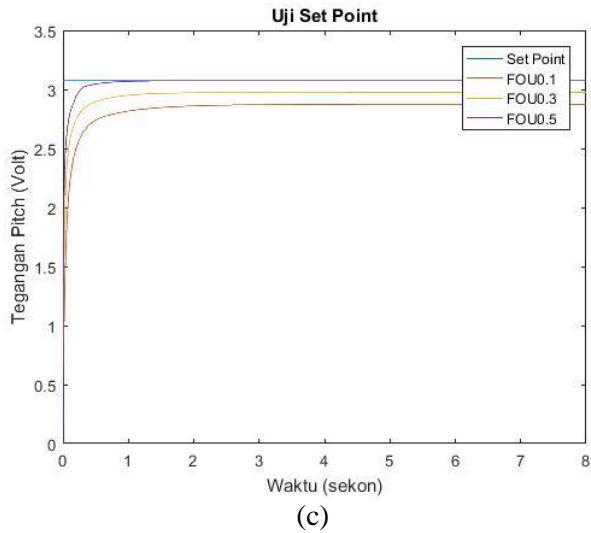
Tabel 4.5 Perbandingan Indeks Performansi Sudut *Yaw* 5MF

Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty											
	± 0.1				± 0.3				± 0.5			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,17	0,36	0,6	0,94	0,1	0,22	0,34	0,47	0,054	0,11	0,17	0,22
Ts (s)	0,42	1	1,85	3,47	0,24	0,67	0,98	1,31	0,13	0,26	0,46	0,49
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,92	0,31	0,04	0,01	0,61	0,02	0,02	0,15	0,87	0,61	0,31	0,31

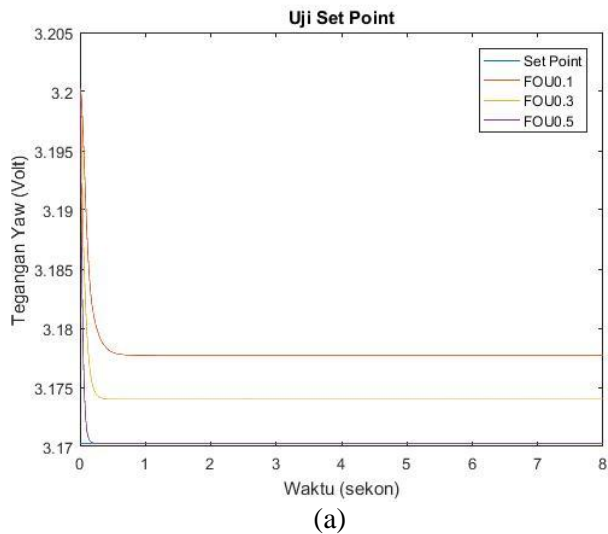
Profil respon sudut *yaw* menunjukkan bahwa KFT2 yang menerapkan FOU $\pm 0,5$ memiliki respon tercepat. Kondisi tersebut terlihat dari tiap kenaikan *set point* yang diberikan, range kemiringan *slope* antara KFT2 yang menerapkan FOU $\pm 0,5$ dengan lainnya mengalami kenaikan signifikan. Kecepatan respon KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ juga terbukti dari hasil perhitungan yang tersaji pada tabel 4.5. Range dari *settling time* dan *rise time* antara FOU $\pm 0,5$ dengan lainnya mengalami kenaikan untuk tiap kenaikan *set point*. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat diketahui bahwa KFT2 dengan penerapan FOU $\pm 0,5$ memiliki kapabilitas untuk mengikuti tiap nilai masukan.

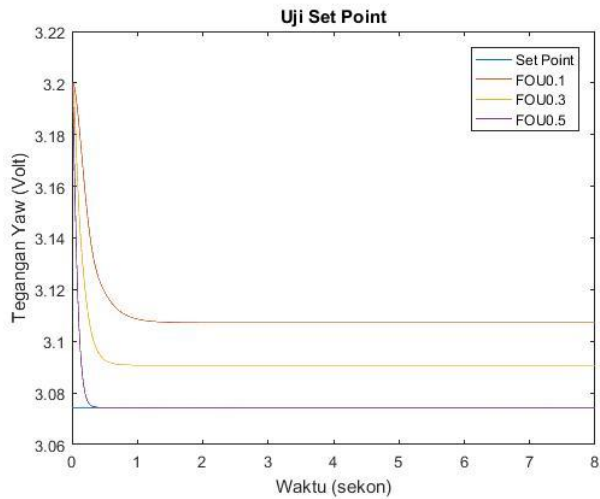
Pada uji *set point* tegangan keluaran LDR, digunakan 3 *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut elevasi matahari dan 3 *set point* tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut *azimuth* matahari dengan masing – masing memiliki fungsi keanggotaan 5 buah. Untuk setpoin tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut elevasi matahari 15⁰, 30⁰ serta 60⁰ berturut-turut adalah 1,91V, 2,57V dan 3,07V. Sedangkan Untuk setpoin tegangan keluaran sensor LDR yang dihasilkan oleh sudut *azimuth* matahari 15⁰, 30⁰ serta 60⁰ berturut-turut adalah 3,17V, 3,07V dan 2,57V. Berikut ini adalah grafik respon tegangan keluaran LDR untuk 5MF.



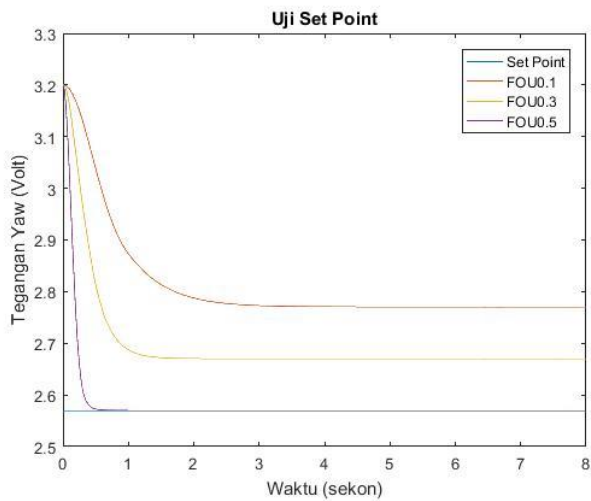


Gambar 4.7 Respon Tegangan *Pitch* 5MF dengan *Set Point* (a) 1,96V
(b) 2,57V (c) 3,07V





(b)



(c)

Gambar 4.8 Respon Tegangan Yaw 5MF dengan *Set Point* (a) 3,17V (b) 3,07V (c) 2,57V

Berdasarkan gambar 4.7 dan 4.8 didapatkan indeks performansi kontrol, yaitu :

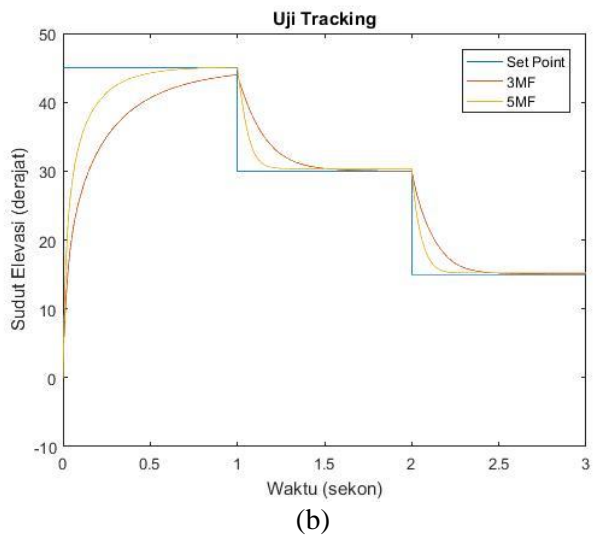
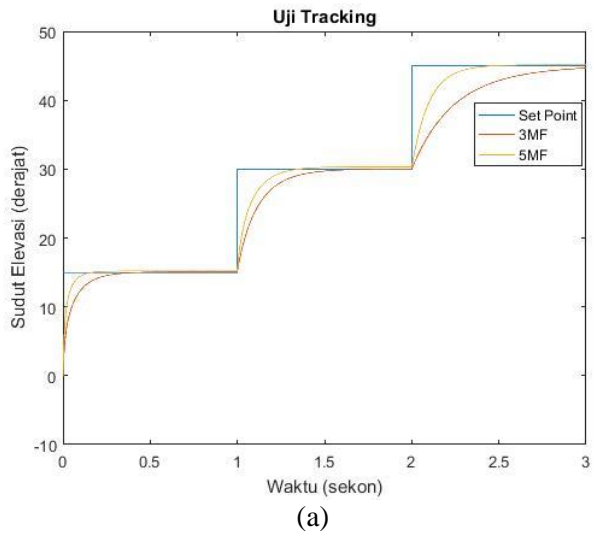
Tabel 4.6 Indeks Performansi Tegangan *Pitch* dan *Yaw* 5MF

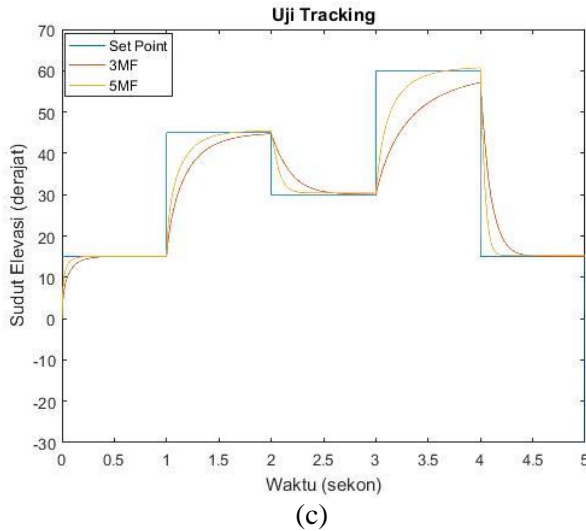
Indeks Performansi	Footprint Of Uncertainty					
	± 0.5 (<i>pitch</i>)			± 0.5 (<i>yaw</i>)		
	1,96V	2,57V	3,07V	3,17V	3,07V	2,57V
Tr (s)	0,062	0,101	0,194	0,197	0,394	0,808
Ts (s)	0,171	0,323	0,62	0,342	0,687	1,406
MOS %	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,011	0,007	0,008	0	0,002	0,17

Grafik hasil uji *set point* sudut memperlihatkan bahwa FOU $\pm 0,5$ masih memiliki respon terbaik ketika jumlah *membership function* diubah menjadi 5MF. Begitu pula pada uji *set point* tegangan *pitch* dan *yaw*, FOU $\pm 0,5$ mampu mencapai *set point* serta keadaan *steady* dalam waktu yang singkat. Hal ini menunjukkan bahwa *range* FOU yang semakin besar akan dapat mengatasi ketidakpastian yang berasal dari faktor internal maupun eksternal sistem. Berdasarkan hal tersebut dalam perancangan sistem penjejak matahari digunakan FOU $\pm 0,5$.

4.3 Uji Tracking KFT2 Menggunakan 3 serta 5 Membership Function

Uji *tracking* pada sistem penjejak matahari berfungsi untuk mengetahui respon dari sistem ketika *set point* berubah berdasarkan waktu dan data yang telah didapat berdasarkan *real plant*. Data yang digunakan pada uji tracking sudut yaitu data waktu berbanding dengan sudut tracking dari *real plant*. Pada uji *tracking*, menggunakan mode KFT2 interval yang memiliki 3MF dan 5MF. Berikut ini adalah grafik respon uji *tracking* sudut *pitch* dari KFT2 interval 3MF dan 5MF

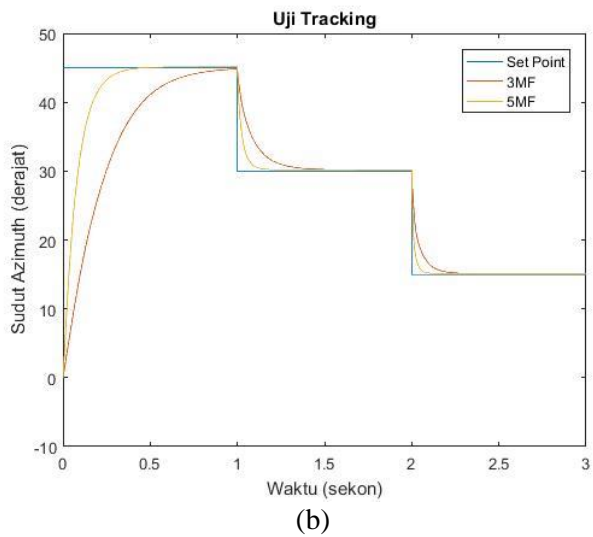
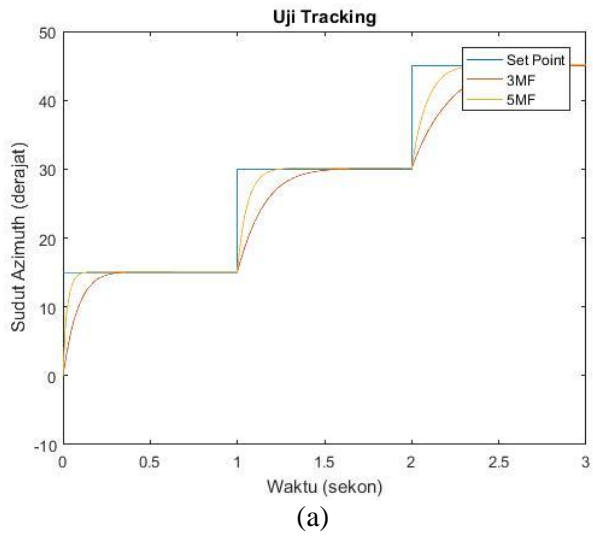


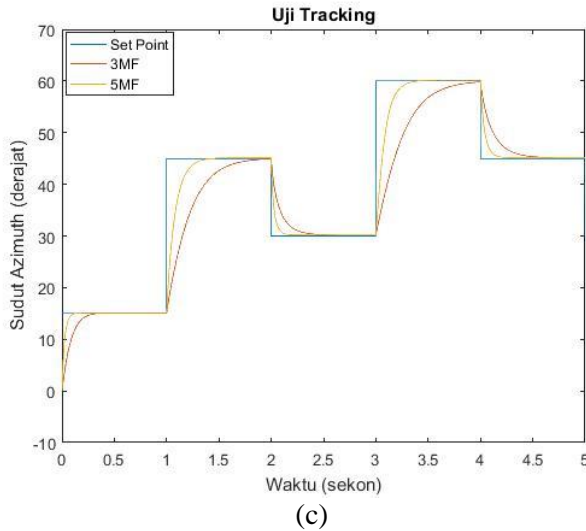


Gambar 4.9 Respon Uji *Tracking* Sudut *Pitch* 3MF dan 5MF (a) *Tracking* Naik (b) *Tracking* Turun (c) *Tracking* Naik-Turun

Berdasarkan hasil uji *tracking* sudut elevasi matahari, respon terbaik dihasilkan oleh fuzzy tipe-2 interval yang menerapkan 5 MF, namun masih terjadi *error* yaitu sebesar 0,2 pada saat *set point* 15, 0,01 pada saat *set point* 30, 0,15 dan 0,18 saat *set point* 60 pada saat *set point* 45. *Error* dapat disebabkan oleh batas - batas antara *membership function* yang kurang tepat. Berdasarkan gambar 4.9, respon kontrol sudut *pitch* yang menggunakan 5MF dapat mengikuti *set point* tanpa ada osilasi serta sangat cepat untuk mencapai *set point*. Kecepatan respon dari KFT2 yang menggunakan 5MF terlihat dari gradien *slope* yang besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa KFT2 dengan penerapan 5MF dapat mengikuti dan menjejak setiap dinamika *set point* yang diberikan dengan cepat. Berdasarkan hasil tersebut, KFT2 dengan 5MF sesuai untuk digunakan menjejak dinamika sudut elevasi matahari sepanjang periode penyinaran.

Pada gambar 4.10 merupakan profil hasil uji *tracking* sudut *azimuth* matahari.

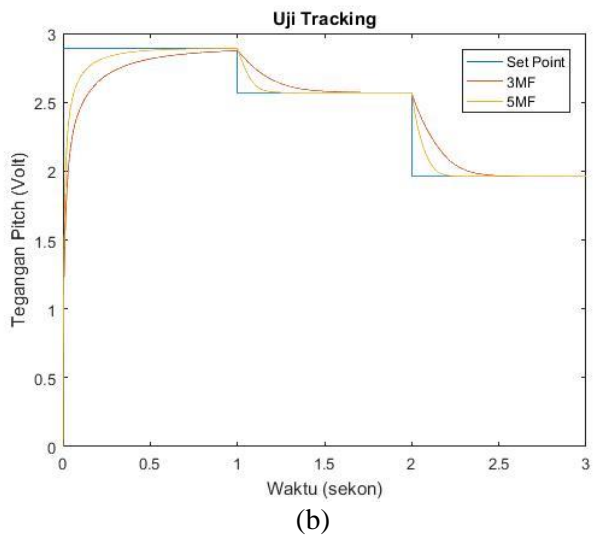
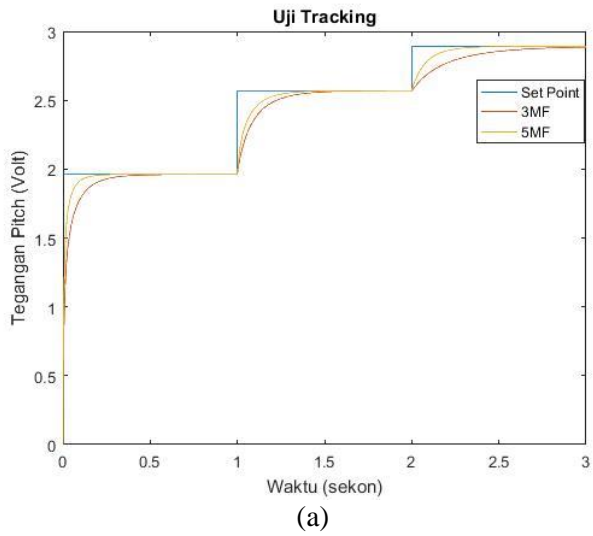


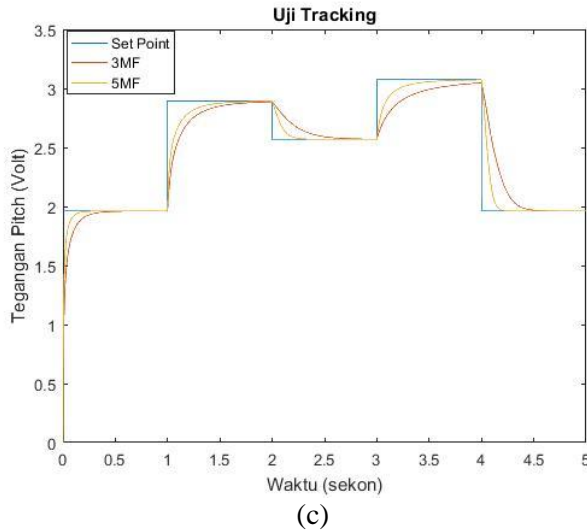


Gambar 4.10 Respon Uji *Tracking* Sudut Yaw 3MF dan 5MF (a) *Tracking Naik* (b) *Tracking Turun* (c) *Tracking Naik-Turun*

Profil hasil uji *tracking* sudut *azimuth* matahari menunjukkan bahwa respon terbaik dihasilkan oleh KFT2 dengan penerapan 5 MF, namun respon kontrol masih memiliki *error* yaitu sebesar 0,173 pada saat *set point* 15, 0,18 pada saat *set point* 30 , 0,14 pada saat *set point* 45 dan 0,18 pada saat *set point* 0,18. Berdasarkan gambar 4.10 respon KFT2 dengan penerapan 5MF dapat menjejak dinamika *set point* tanpa ada osilasi. Kecepatan respon kontrol dalam menjejak dapat dilihat dari kemiringan *slope* saat pengujian *set point* naik dan turun. KFT2 dengan penerapan 5MF memiliki kemiringan *slope* respon yang besar. Kondisi ini menandakan bahwa kontrol dapat merespon dengan cepat. Hal ini dapat diartikan bahwa KFT2 dengan 5MF sangat sesuai untuk digunakan menjejak pergerakan dan perubahan sudut *azimuth* matahari.

Grafik respon uji *tracking* tegangan *pitch* dari KFT2 interval 3MF dan 5MF dapat dilihat pada gambar 4.11



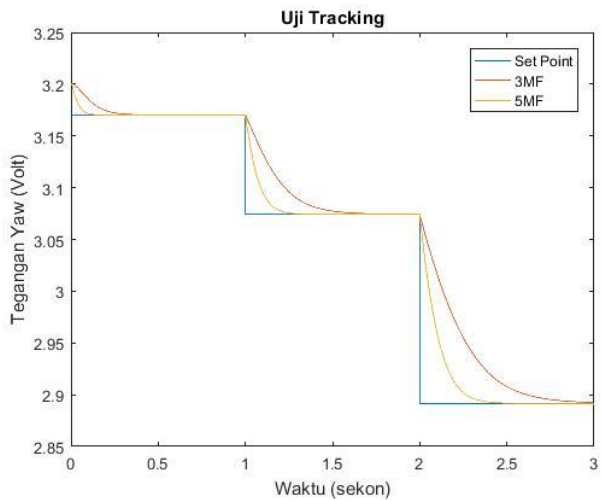


Gambar 4.11 Respon Uji *Tracking* Tegangan *Pitch* 3MF dan 5MF (a) *Tracking* Naik (b) *Tracking* Turun (c) *Tracking* Naik-Turun

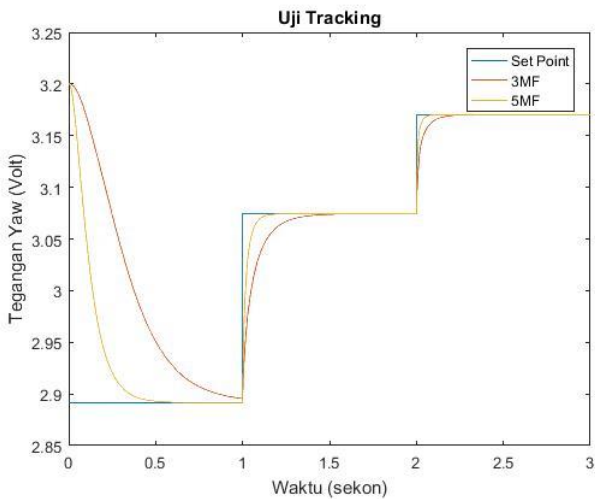
Pada uji *tracking* tegangan *pitch*, respon yang dihasilkan oleh KFT2 dengan penerapan 5MF memiliki performansi yang baik. Berdasarkan uji *tracking* yang dilakukan, respon KFT2 dengan penerapan 5MF memiliki *error* yaitu sebesar 0,011% pada saat *set point* tegangan 1,961V, 0,007% saat *set point* tegangan 2,57V serta 0,015% saat *set point* 3,074V. Tren respon dari KFT2 dengan penerapan 5MF menunjukkan hasil serupa pada uji *tracking* sudut dengan uji *tracking* tegangan keluaran LDR. Berdasarkan gambar 4.11 respon tegangan keluaran LDR sudut *pitch* yang menggunakan 5MF dapat mengikuti *set point* tanpa ada osilasi serta sangat cepat untuk mencapai *set point* dibandingkan dengan menggunakan 3MF. Hal ini menandakan bahwa saat digunakan 5MF maka range dari variabel fungsi keanggotaan (MF) menjadi lebih kecil sehingga hal ini akan meningkatkan akurasi fuzzifikasi input dalam kontrol fuzzy. Hal tersebut menghasilkan respon yang cukup cepat saat digunakan pada sistem *solar tracker* untuk menjejak posisi matahari. Berdasarkan hasil uji *tracking*, KFT2 dengan penerapan 5MF akan

digunakan pada sistem penjejak matahari untuk *tracking* sudut elevasi matahari.

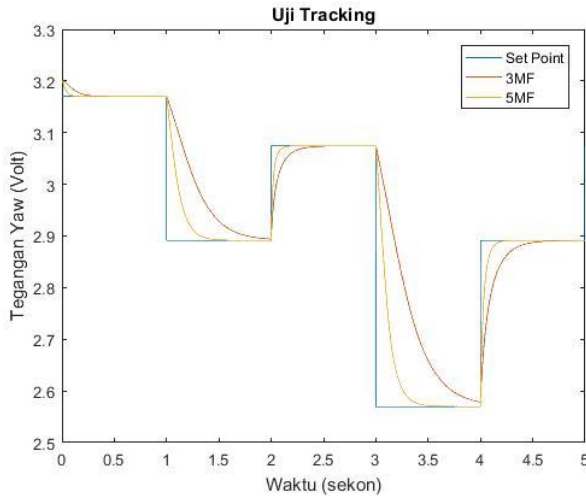
Gambar 4.12 menyajikan profil respon uji *tracking* tegangan yaw dari KFT2 3MF dan 5MF.



(a)



(b)



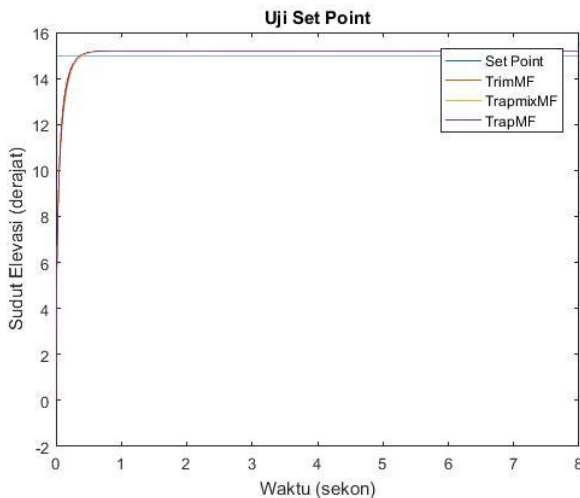
(c)

Gambar 4.12 Respon Uji *Tracking* Tegangan Yaw 3MF dan 5MF (a) *Tracking* Naik (b) *Tracking* Turun (c) *Tracking* Naik-Turun

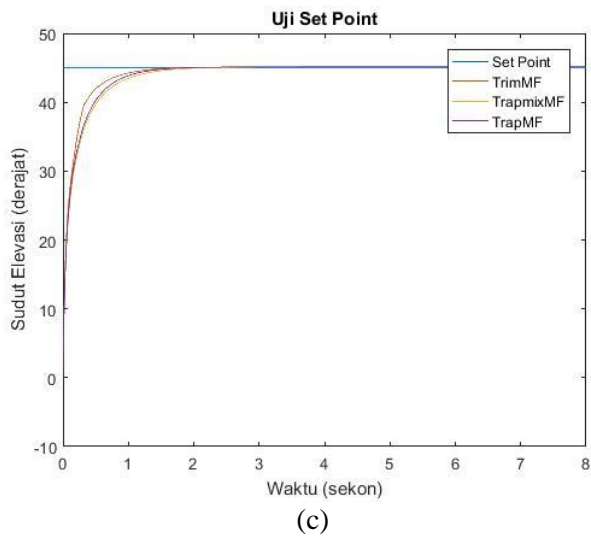
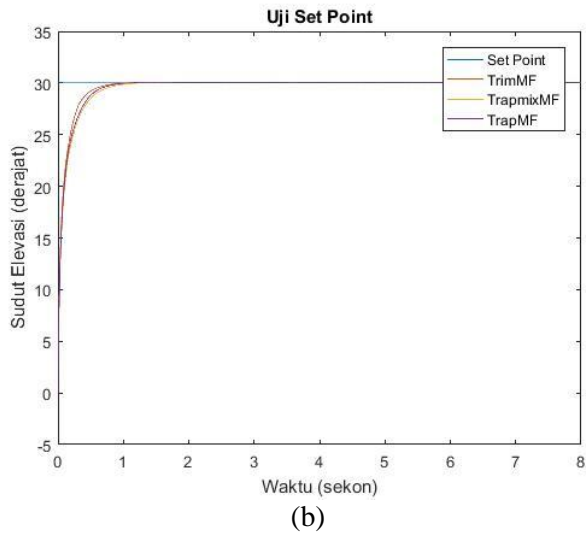
Berdasarkan profil hasil uji *tracking* tegangan yaw menunjukkan bahwa respon terbaik dihasilkan oleh KFT2 dengan penerapan 5 MF. Respon kontrol tersebut memiliki *error* yaitu sebesar 0,0005% pada saat *set point* tegangan 3,17V, 0,0024% saat *set point* tegangan 3,07V serta 0,175% saat *set point* 2,57V. Dari gambar 4.12 dapat diperoleh bahwa respon tegangan keluaran LDR sudut yaw yang menggunakan 5MF dapat mengikuti *set point* tanpa terjadi lonjakan serta mampu menjejak dinamika *set point* yang diberikan. Hal tersebut berarti bahwa KFT2 dengan penerapan 5MF dapat melakukan *tracking* sudut *azimuth* matahari. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, perancangan sistem penjejak matahari akan menggunakan KFT2 dengan penerapan 5 MF untuk *tracking* sudut *azimuth* matahari.

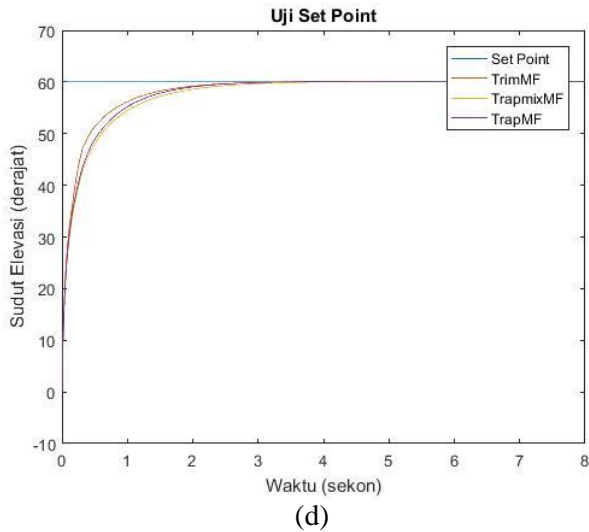
4.4 Perbandingan Respon Uji *Set Point* dan *Tracking* KFT2 dengan Penerapan Variasi Bentuk MF

Pada metode kontrol fuzzy tipe-1 maupun tipe-2, keduanya memiliki bentuk fungsi keanggotaan yang beragam. Bentuk fungsi keanggotaan tersebut diantaranya adalah segitiga, trapesium, segitiga-trapesium, *gaussian*, *sigmoid* dan sebagainya. Pada perancangan *solar tracker* ini akan dibandingkan tiga bentuk fungsi keanggotaan pada uji setpoint dan *tracking* yaitu segitiga (*trimMF*), segitiga-trapesium (*trapmixMF*) serta trapesium (*trapMF*) yang masing-masing memiliki 5MF. Kemudian respon terbaik dari salah satu fungsi keanggotaan dalam uji setpoint dan *tracking* akan digunakan dalam kontrol sistem *solar tracker*. Berikut ini adalah grafik respon uji *set point* sudut serta tegangan *pitch* dan *yaw* dari fungsi keanggotaan bentuk segitiga, segitiga-trapesium serta trapesium.



(a)





Gambar 4.13 Respon Sudut *Pitch Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

Berdasarkan gambar 4.13 didapatkan indeks performansi respon sudut pitch yaitu,

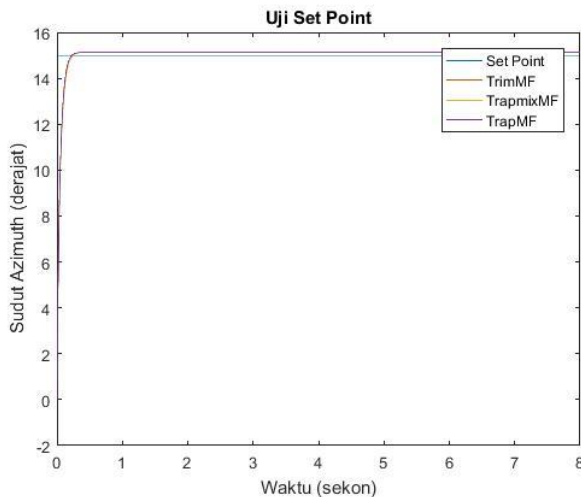
Tabel 4.7 Perbandingan Indeks Performansi Sudut *Pitch* dengan Variasi Bentuk MF

Indeks Performansi	Bentuk Membership Function											
	TrimMF				TrapmixMF				TrapMF			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,063	0,12	0,21	0,4	0,16	0,34	0,6	0,98	0,16	0,31	0,55	0,91
Ts (s)	0,15	0,44	0,78	1,28	0,39	1,14	2,09	3,74	0,35	0,99	1,8	3,2
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	1,3	0,31	0,31	0,29	0,61	0,02	0,02	0,15	0,87	0,61	0,31	0,31

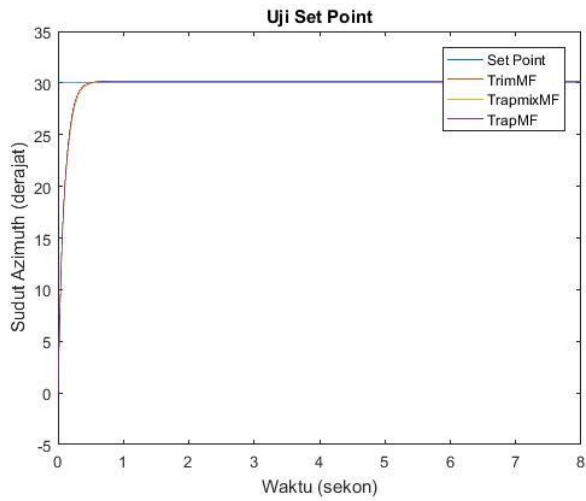
Profil respon sudut *pitch* menunjukkan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga memiliki respon yang terbaik. Hal tersebut dapat dilihat dari *trend* grafik responnya yang memiliki kemiringan *slope* yang besar. Ketiga profil hasil simulasi hampir berimpit pada saat *set*

point 15^0 , namun grafik respon dengan MF segitiga mulai mengalami kenaikan kemiringan *slope* saat *set point* diubah menjadi 30^0 . Kondisi tersebut berlanjut untuk tiap kenaikan *set point*. Adapun hasil perhitungan yang tersedia ada tabel 4.7 menunjukkan hal yang serupa dengan grafik respon. Ketiganya hanya berselisih 0,097 detik untuk mencapai *set point* dan *range* tersebut semakin besar untuk tiap kenaikan *set point*. Hal ini menunjukkan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga memiliki kemampuan untuk menjaga kestabilan dalam menjejak sudut elevasi matahari.

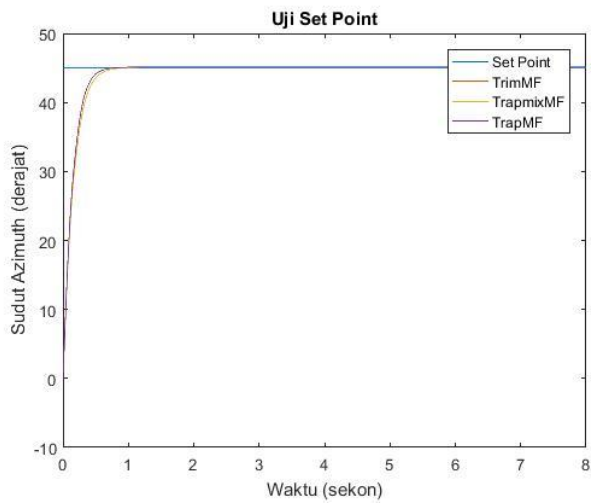
Gambar 4.14 menyajikan profil respon sudut *yaw* untuk variasi bentuk MF,



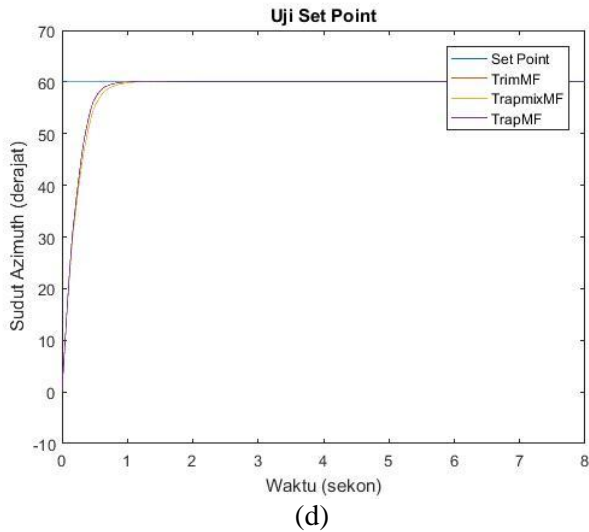
(a)



(b)



(c)



Gambar 4.14 Respon Sudut *Yaw Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan *Set Point* (a) 15^0 (b) 30^0 (c) 45^0 (d) 60^0

Indeks performansi dari respon sudut *yaw* dapat dilihat pada tabel 4.8.

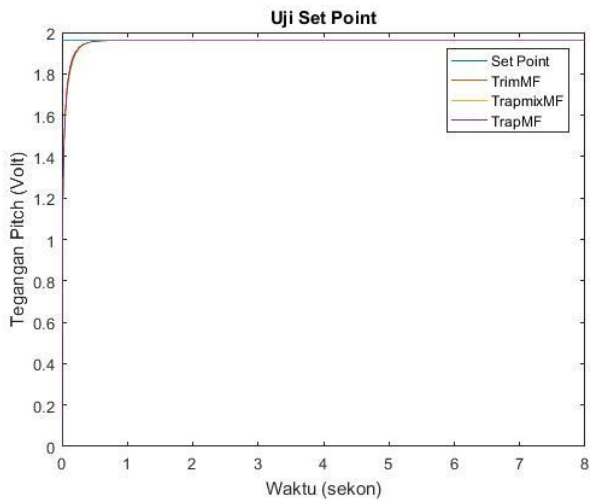
Tabel 4.8 Perbandingan Indeks Performansi Sudut *Yaw* dengan Variasi Bentuk MF

Indeks Performansi	Bentuk <i>Membership Function</i>											
	TrimMF				TrapmixMF				TrapMF			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
Tr (s)	0,29	0,29	0,42	0,52	0,15	0,29	0,42	0,52	0,066	0,27	0,38	0,47
Ts (s)	0,455	0,46	0,7	0,85	0,23	0,46	0,7	0,85	0,103	0,42	0,6	0,3
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,82	0,59	0,28	0,29	0,86	0,59	0,28	0,29	0,87	0,59	0,3	0,3

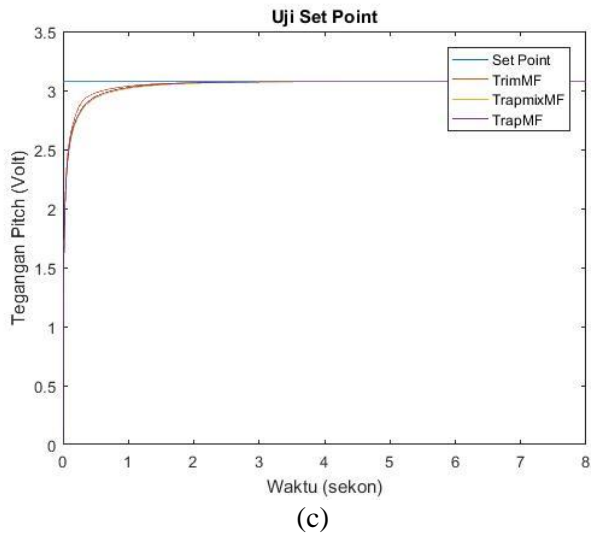
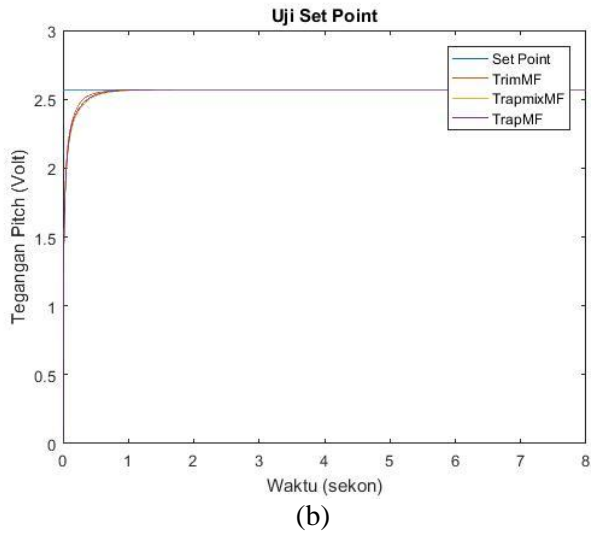
Berdasarkan grafik respon sudut *yaw* dapat diperoleh bahwa KFT2 dengan MF berbentuk trapesium memiliki respon yang lebih cepat daripada lainnya. Meskipun dapat diamati bahwa ketiga KFT2 dengan variasi bentuk MF memiliki respon yang hampir berimpit.

Perbedaan ketiga respon kontrol tersebut dapat dilihat pada tabel 4.8, ketiganya memiliki selisih waktu naik rata-rata 0,0835 detik. Berdasarkan perhitungan indeks performansi, KFT2 dengan MF berbentuk segitiga dominan memiliki respon tercepat dibandingkan dengan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga dapat menjejak sudut *azimuth* dengan baik.

Pada gambar 4.15 berikut ini tersaji profil respon tegangan *pitch* untuk variasi bentuk MF.



(a)



Gambar 4.15 Respon Tegangan *Pitch Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium dengan *Set Point* (a) 1,96V (b) 2,57V (c) 3,07V

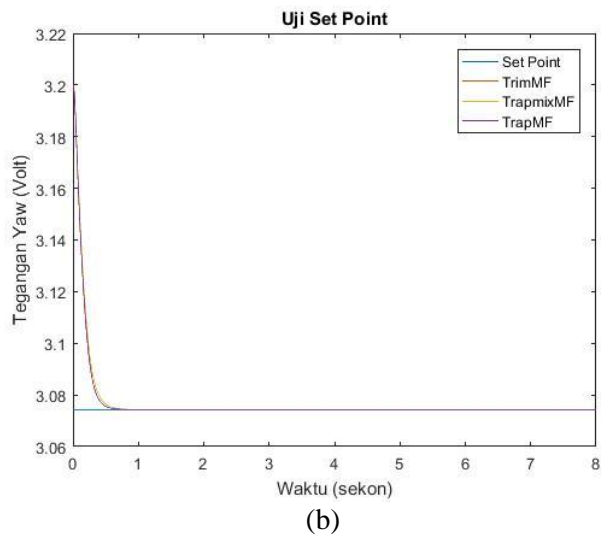
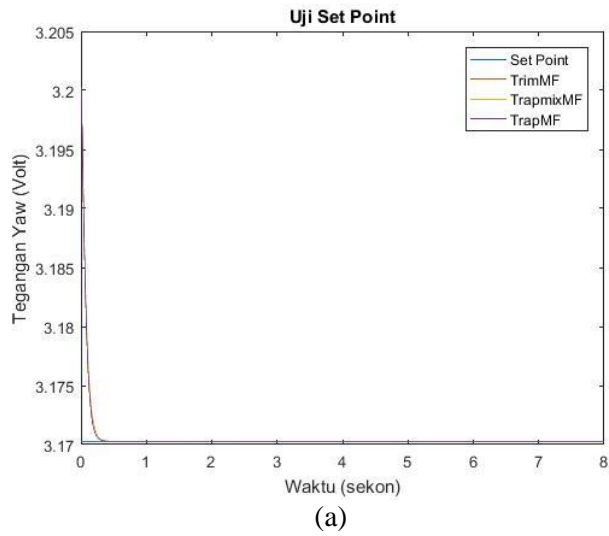
Berdasarkan gambar 4.15 dapat diperoleh indeks performansi dari respon di atas yaitu,

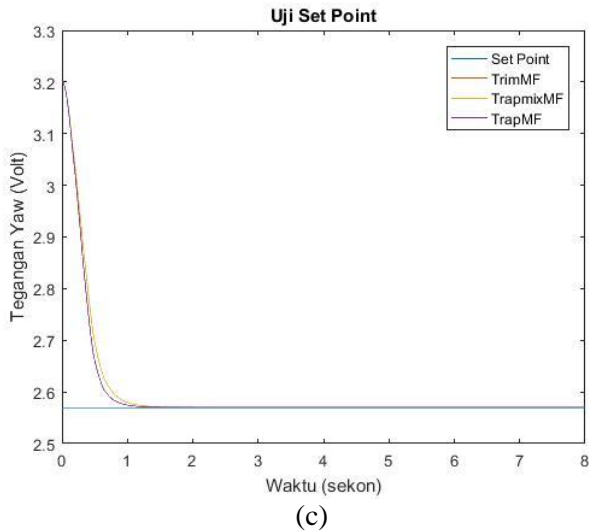
Tabel 4.9 Perbandingan Indeks Performansi Tegangan *Pitch* dengan Variasi Bentuk MF

Indeks Performansi	Bentuk <i>Membership Function</i>								
	TrimMF			TrapmixMF			TrapMF		
	1,96V	2,57V	3,07V	1,96V	2,57V	3,07V	1,96V	2,57V	3,07V
Tr (s)	0,146	0,224	0,318	0,168	0,274	0,417	0,155	0,251	0,392
Ts (s)	0,388	0,627	1,375	0,424	0,822	1,72	0,388	0,737	1,524
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,12	0,027	0,034	0,17	0,046	0,059	0,09	0,028	0,034

Grafik respon tegangan *pitch* menunjukkan bahwa ketiga KFT2 dengan variasi bentuk MF memiliki profil respon yang hampir berimpit. Kemiringan *slope* dari ketiga respon terlihat hampir sama dan bergerak secara simultan untuk semua *set point* yang diujikan. Perbedaan antara ketiganya dapat dilihat secara jelas pada indeks performansi yang tersedia pada tabel 4.9. Pada tabel 4.9 menunjukkan selang waktu untuk mencapai *set point* maupun keadaan *steady* sangat kecil. Selisih waktu rata-rata untuk mencapai *set point* antara ketiga respon ini untuk tiap kenaikan *set point* yaitu sebesar 0,057 detik. Kecilnya selisih waktu ketiganya menunjukkan bahwa KFT2 untuk ketiga variasi bentuk MF memiliki kapabilitas yang hampir sama dalam melakukan penjejakan *set point* yang diberikan. Dari perbedaan tersebut, KFT2 dengan MF berbentuk segitiga memiliki respon yang tercepat. Hal ini menandakan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga dapat mengikuti setiap *set point* yang diberikan dengan baik.

Gambar 4.16 berikut ini merupakan profil respon tegangan *yaw* untuk variasi bentuk MF pada KFT2.





Gambar 4.16 Respon Tegangan *Yaw Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapezium dan Trapezium dengan *Set Point* (a) 3,17V (b) 3,07V (c) 2,57V

Indeks performansi dari profil respon tegangan *yaw* untuk varias bentuk MF tersedia pada tabel 4.10

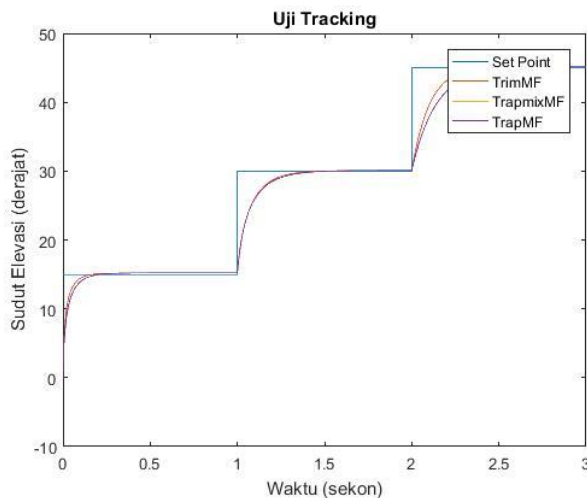
Tabel 4.10 Perbandingan Indeks Performansi Tegangan *Yaw* dengan Variasi Bentuk MF

Indeks Performansi	Bentuk <i>Membership Function</i>								
	TrimMF			TrapmixMF			TrapMF		
	3,17V	3,07V	2,57V	3,17V	3,07V	2,57V	3,17V	3,07V	2,57V
Tr (s)	0,324	0,351	0,617	0,189	0,351	0,617	0,086	0,324	0,524
Ts (s)	0,637	0,669	1,183	0,325	0,669	1,183	0,144	0,564	0,985
MOS %	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS %	0,001	0,002	0,018	0	0,002	0,018	0	0,002	0,015

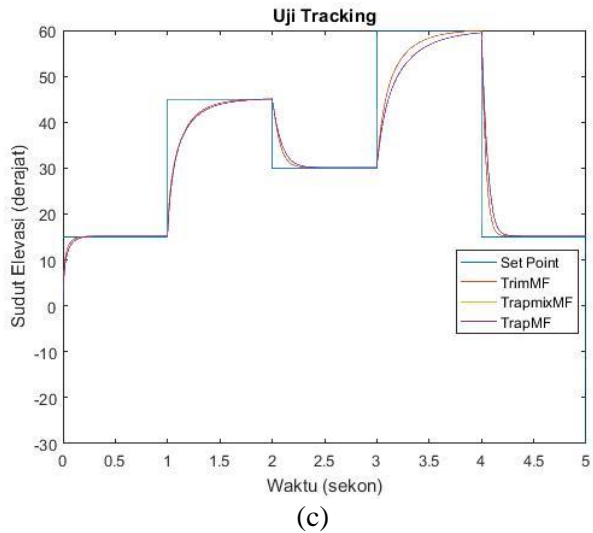
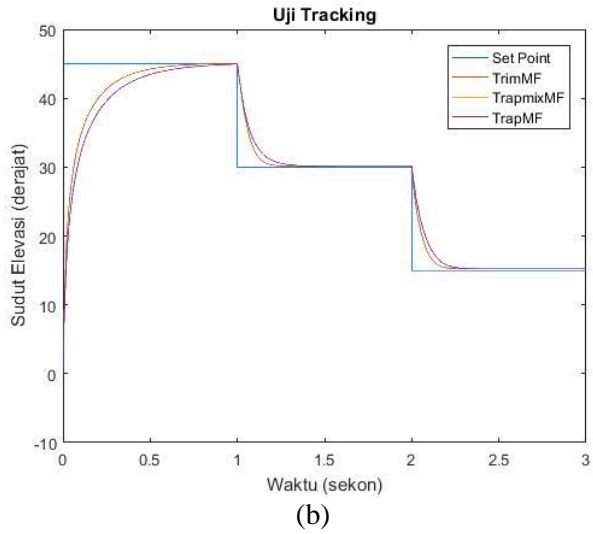
Berdasarkan tabel 4.10 indeks performansi respon tegangan *yaw* menunjukkan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk trapesium memiliki respon yang cepat. Kecepatan respon kontrol tersebut tidak begitu terlihat pada profil respon tegangan *yaw* yang tersedia pada gambar 4.16. Hal tersebut karena ketiga respon kontrol hampir

berimpit dan memiliki perbedaan gradien *slope* yang kecil. Kondisi ini didukung oleh data indeks performansi pada tabel 4.10 yang menunjukkan bahwa perbedaan waktu untuk mencapai *set point* dari ketiganya yaitu berkisar 0,119 detik. Selang waktu yang cukup kecil diantara ketiga variasi bentuk MF sangat realistis. Berdasarkan tabel 4.10, KFT2 dengan MF berbentuk trapesium mendominasi kecepatan respon untuk tiap *set point* yang diujikan. Hal ini menandakan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk trapesium memiliki kapabilitas untuk mengikuti perubahan *set point*.

Berikut ini adalah grafik respon uji *tracking* sudut *pitch* dari fungsi keanggotaan bentuk segitiga, segitiga-trapesium serta trapesium.



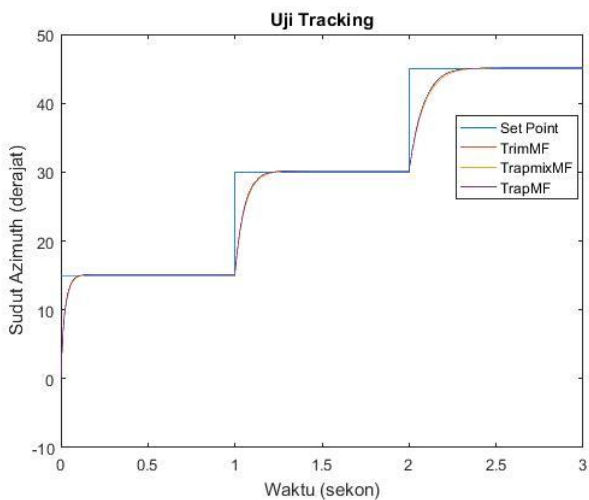
(a)

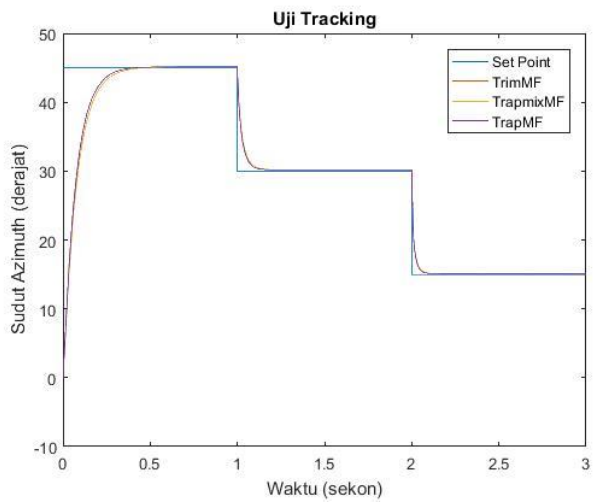


Gambar 4.17 Respon Uji Tracking Sudut Pitch Membership Function Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) Tracking Naik (b) Tracking Turun (c) Tracking Naik-Turun

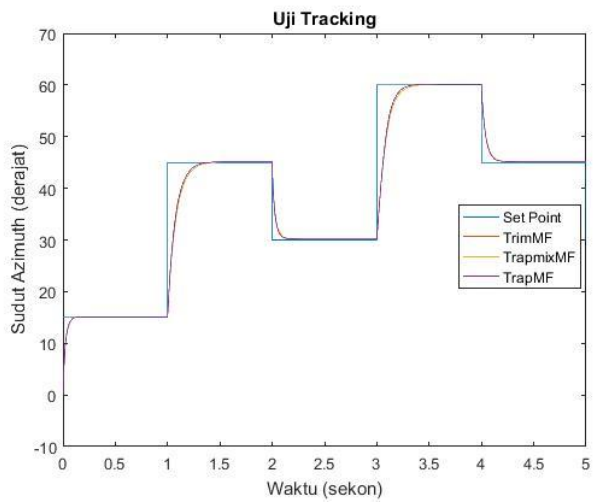
Profil respon uji *tracking* sudut *pitch* menunjukkan bahwa saat *set point* sudut elevasi semakin besar, perbedaan kemiringan *slope* antara ketiga jenis kontrol bertambah, sehingga pada saat *set point* bernilai 60^0 terlihat jelas bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga memiliki respon tercepat dibandingkan dengan kontrol dengan bentuk MF lainnya. Hal ini berarti ketika *set point* bertambah KFT2 dengan MF berbentuk segitiga mampu menanggapi dinamika *set point* yang besar. Kondisi ini sangat diperlukan untuk menjejak sudut elevasi matahari. Fluktuasi cuaca sering terjadi yang mengakibatkan posisi matahari tidak terdeteksi secara pasti. Sebagai contoh ketika mendung, pada kondisi ini posisi matahari tidak diketahui. Saat mendung hilang, posisi matahari memiliki kemungkinan telah bergerak hingga belasan atau hingga puluhan derajat. Pada kondisi ini diperlukan kontrol yang mempunyai kemampuan dapat menjejak perubahan *set point* yang besar dengan cepat. Berdasarkan hal tersebut, KFT2 dengan MF berbentuk segitiga dapat diterapkan pada sistem *solar tracker* untuk menjejak sudut elevasi matahari.

Gambar 4.18 merupakan profil respon uji *tracking* sudut *yaw* terhadap perubahan *set point* yang diberikan.





(b)

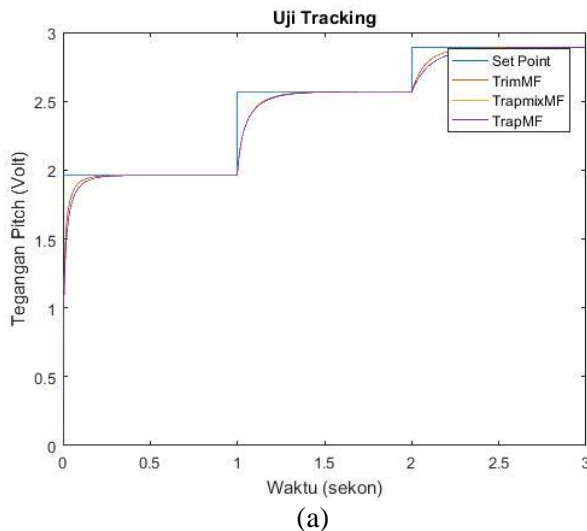


(c)

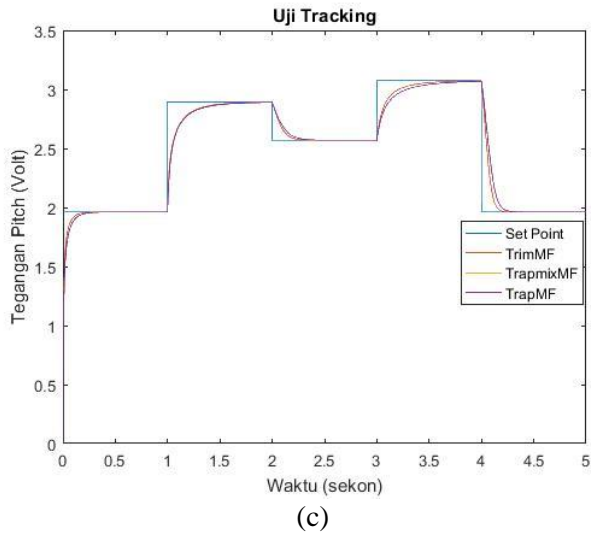
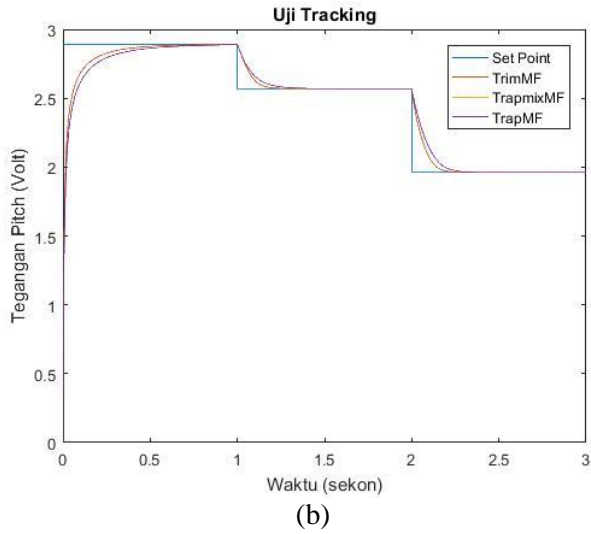
Gambar 4.18 Respon Uji *Tracking* Sudut *Yaw* *Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) *Tracking* Naik (b) *Tracking* Turun (c) *Tracking* Naik-Turun

Berdasarkan profil respon uji *tracking* sudut *yaw* dapat diamati bahwa ketiga respon kontrol memiliki kemiringan *slope* yang hampir sama. Ketiga respon kontrol terlihat berimpit dengan grafik respon KFT2 dengan MF berbentuk trapesium berada pada posisi tercepat. Hal ini berarti KFT2 dengan MF berbentuk trapesium memiliki respon yang baik dalam menjejak dinamika *set point* yang diberikan. Berdasarkan hasil uji *tracking*, sistem penjejak matahari dapat menggunakan KFT2 dengan MF berbentuk trapesium untuk menjejak sudut *azimuth* matahari.

Grafik berikut ini menyajikan profil respon uji *tracking* tegangan keluaran LDR *pitch* dari fungsi keanggotaan bentuk segitiga, segitiga-trapesium serta trapesium.



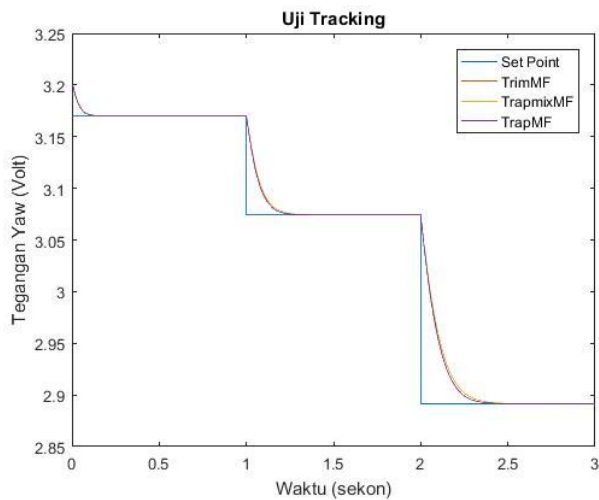
(a)



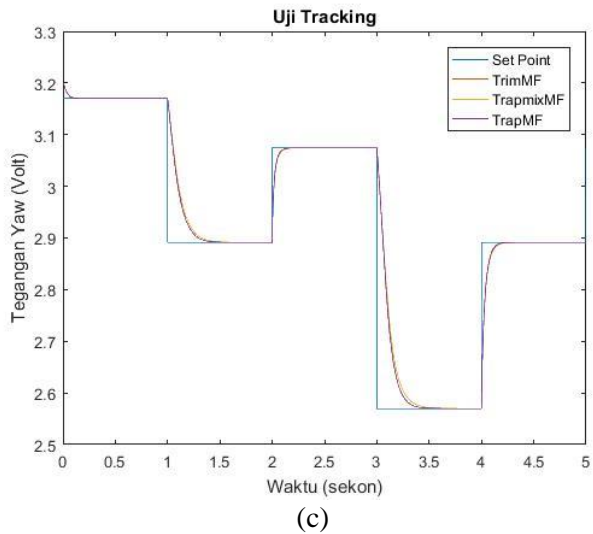
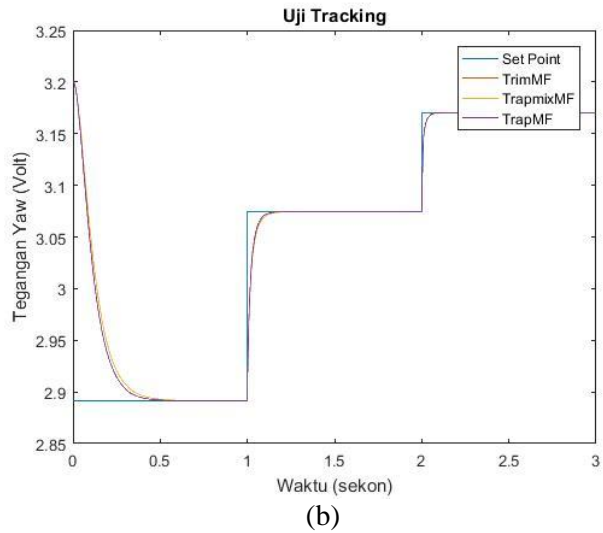
Gambar 4.19 Respon Uji *Tracking* Tegangan *Pitch Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) *Tracking Naik* (b) *Tracking Turun* (c) *Tracking Naik-Turun*

Pada gambar 4.19 yang menyajikan respon uji *tracking* tegangan *pitch* menunjukkan bahwa KFT2 dengan MF berbentuk segitiga konsisten mendominasi kecepatan penjejakan perubahan *set point*, walaupun perbedaan gradien *slope* tidak terlalu jauh. KFT2 dengan MF berbentuk segitiga memiliki kemampuan dan kecepatan yang tinggi untuk dijadikan metode kontrol pada perancangan sistem *solar tracker*. Karakteristik tersebut sangat diperlukan pada proses penjejakan dinamika sudut elevasi matahari agar penyerapan energi matahari oleh panel surya meningkat.

Gambar 4.20 menunjukkan profil respon tegangan *yaw* untuk KFT2 dengan variasi bentuk MF.



(a)



Gambar 4.20 Respon Uji *Tracking* Tegangan Yaw *Membership Function* Bentuk Segitiga, Segitiga-Trapesium dan Trapesium (a) *Tracking* Naik (b) *Tracking* Turun (c) *Tracking* Naik-Turun

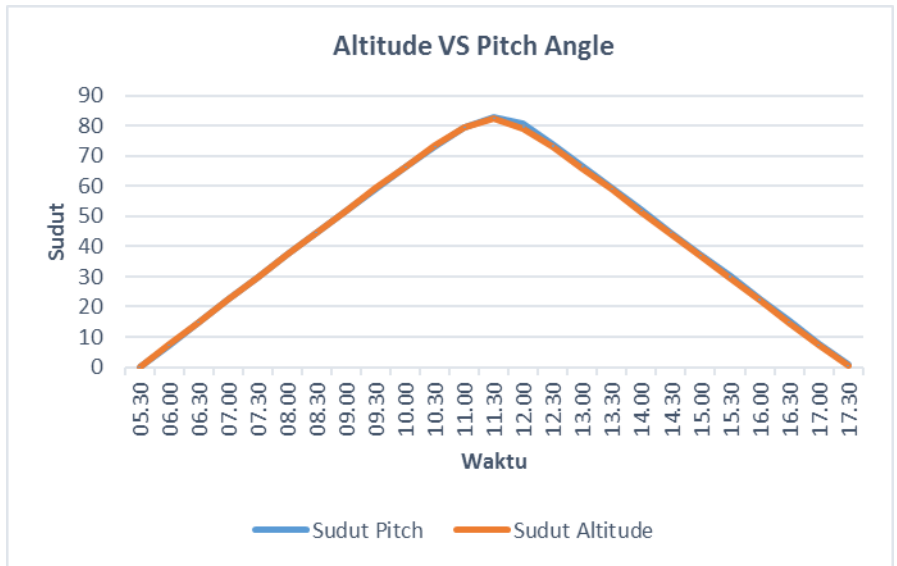
Dari profil respon tegangan *yaw*, dapat dilihat bahwa respon terbaik dari *controller* pada saat uji *tracking* tegangan *yaw* dihasilkan oleh KFT2 dengan MF trapesium, meskipun pada uji *tracking* tersebut ketiga jenis MF ini memiliki grafik respon hampir berimpit. Konsistensi KFT2 dengan MF berbentuk sangat sesuai diterapkan untuk menjejak perubahan sudut *azimuth* matahari pada waktu penyinaran. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, pada perancangan sistem penjejak matahari digunakan KFT2 dengan 5 MF berbentuk trapesium untuk *tracking* sudut *azimuth* matahari.

4.5 Penerapan KFT2 Interval Pada Perancangan Sistem Penjejak Matahari Dua Sumbu

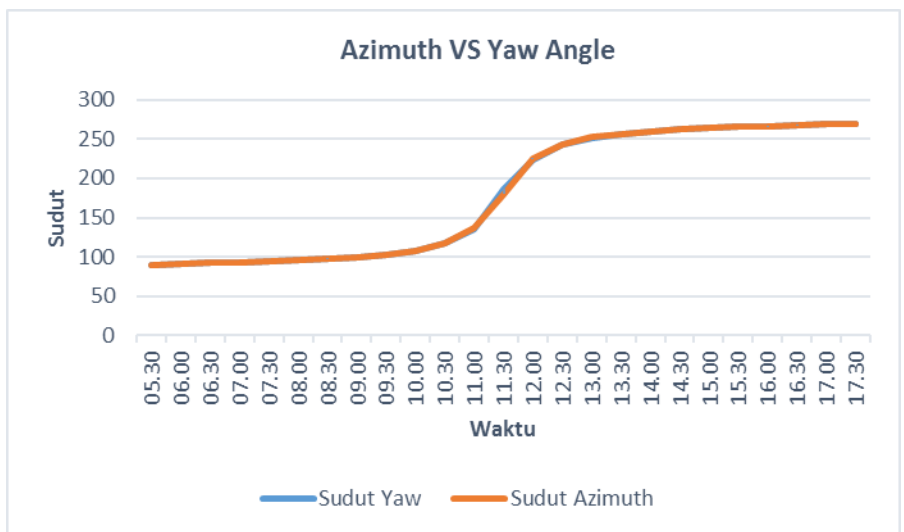
Pada uji setpoint maupun *tracking* didapatkan bahwa KFT2 interval untuk sistem penjejak matahari yang paling sesuai adalah *membership function* yang memiliki jumlah variabel 5 kriteria berbentuk segitiga untuk *tracking* sudut elevasi matahari serta berbentuk trapesium untuk *tracking* sudut *azimuth* matahari. Hal ini dikarenakan kecepatan dari kontrol untuk mencapai *set point* sangat cepat. Karakteristik tersebut sangat sesuai untuk sistem penjejak matahari yang harus memiliki kecepatan dalam hal menjejak posisi matahari.

Data yang digunakan dalam simulasi ini sebagai input sistem adalah data radiasi matahari serta suhu panel surya selama 12 jam (05.30 – 17.30) dengan pengambilan data per 30 menit, data posisi matahari selama 12 jam serta data spesifikasi motor DC maupun panel surya. Kemudian ketika sistem mulai berjalan, panel surya diharapkan selalu menjejak posisi matahari dari matahari terbit hingga terbenam. Dengan posisi panel surya selalu menghadap matahari, daya yang dihasilkan panel surya akan meningkat, sehingga efisiensi dari panel surya juga akan meningkat

Berikut ini adalah hasil *tracking* sudut elevasi serta *azimuth* matahari selama 12 jam.



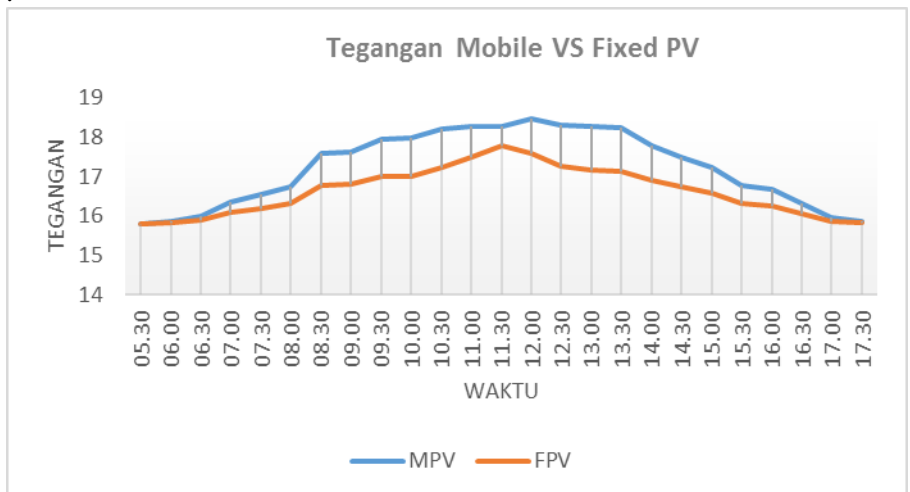
Gambar 4.21 Hasil *Tracking* Sudut Elevasi Matahari



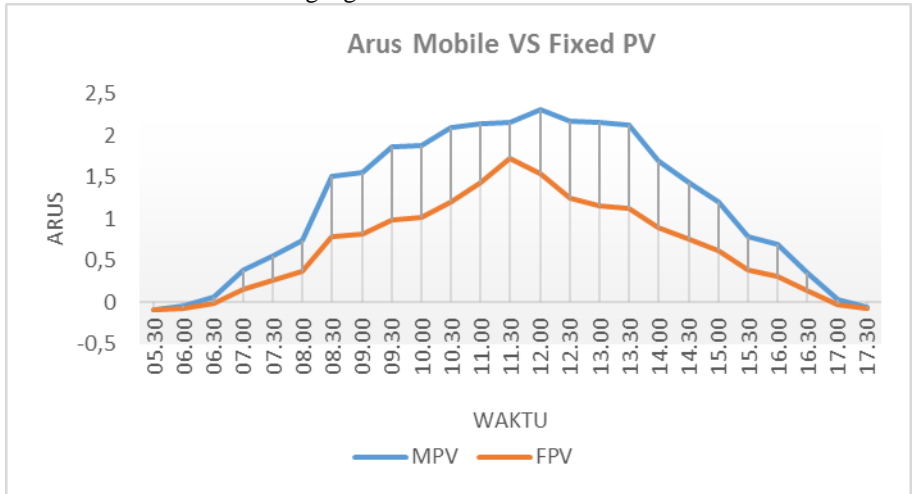
Gambar 4.22 Hasil *Tracking* Sudut Azimuth Matahari

Berdasarkan profil hasil *tracking* sudut elevasi matahari dapat dilihat bahwa sudut *pitch* dan elevasi matahari hampir berimpit sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* dapat menjejak sudut elevasi matahari meskipun masih terdapat *error* sudut. *Error* sudut rata-rata dari hasil simulasi yaitu sebesar $-0,27826$ derajat. Sedangkan untuk profil hasil *tracking* sudut azimuth matahari menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* dapat menjejak sudut azimuth matahari dengan baik dengan menghasilkan *error* sudut rata-rata sebesar $-0,0645$ derajat. Dari hasil keduanya dapat diketahui bahwa sistem *solar tracker* dapat mengikuti perubahan posisi matahari dengan akurasi yang cukup baik. Berdasarkan hasil tersebut, kontrol yang telah dirancang dapat digunakan dalam sistem penjejak matahari.

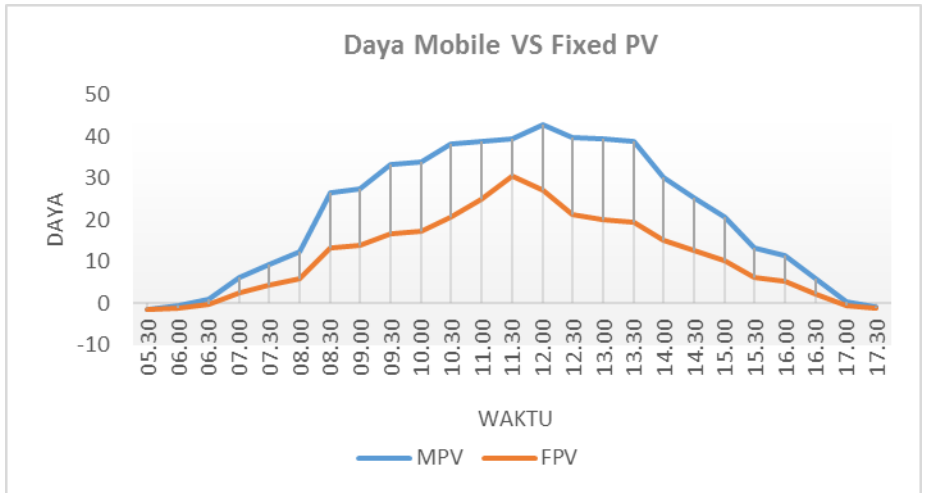
Pada penerapan sistem *solar tracker* untuk panel surya diperlukan *error* sudut yang sangat kecil. Hal ini dikarenakan *error* sudut yang kecil mengindikasikan bahwa posisi panel surya selalu menghadap matahari. Sehingga daya yang dihasilkan panel surya akan meningkat. Berikut ini adalah profil tegangan, arus serta daya yang dihasilkan panel surya dengan *solar tracker* (*Mobile PV*) serta tanpa *solar tracker* (*Fixed PV*).



Gambar 4.23 Tegangan Keluaran *Mobile PV VS Fixed PV*



Gambar 4.24 Arus Keluaran *Mobile PV VS Fixed PV*



Gambar 4.25 Daya Keluaran *Mobile PV VS Fixed PV*

Profil dari hasil simulasi memperlihatkan bahwa kondisi cuaca cerah saat pengukuran. Hal ini dapat dilihat dari pola grafik yang menyerupai parabola dengan titik maksimum pada jam 12 yang

merupakan periode dari posisi matahari berada pada kondisi tegak lurus terhadap bidang tanah. Pada kondisi cuaca cerah dapat diprediksi menggunakan nalar bahwa pada keadaan ini efisiensi dari panel surya akan meningkat signifikan dan linier dengan kondisi cuaca yang cerah. Peningkatan efisiensi daya dapat dihitung dengan menghitung perbedaan jumlah daya keluaran PV yang dihasilkan dari *mobile pv* dengan *fixed pv* selama periode 12 jam. Berdasarkan profil hasil simulasi, *mobile pv* mengalami peningkatan sebesar 89,43 persen. Peningkatan yang cukup besar ini dikarenakan pada sistem *solar tracker* mampu menjejak matahari dengan *error* sangat kecil, sehingga dalam hal ini, panel surya hampir selalu menghadap posisi matahari.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter – parameter komponen penyusun sistem *solar tracker* didapatkan melalui data hasil pengukuran langsung. Parameter tersebut yaitu parameter pada sensor LDR berupa kuat pencahayaan matahari. Parameter pada motor DC berupa konstanta tegangan (K_e), Konstanta Torsi (K_t), Resistansi (R), Induktansi (L), *viscous friction coefficient* (B), inersia motor (J_m), torsi motor (T_m) serta resolusi motor (Res). Parameter pada PV berupa I_{sh} , R_{pv} , R_{sh} serta I_o .
2. Berdasarkan uji *set point* maupun uji *tracking*, kontrol fuzzy tipe-2 interval dengan 5MF ($FOU \pm 0,5$) berbentuk segitiga memiliki respon terbaik untuk *tracking* sudut elevasi matahari. Sedangkan untuk *tracking* sudut *azimuth* matahari, kontrol fuzzy tipe-2 interval dengan 5MF ($FOU \pm 0,5$) berbentuk trapesium memiliki respon terbaik. Panel surya dengan sistem penjejak dengan penerapan parameter tersebut pada kontrol fuzzy tipe-2 interval mengalami peningkatan daya sebesar 89,43 persen.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk pengembangan selanjutnya adalah

1. Dilakukan proses optimasi terhadap fungsi keanggotaan kendali logika fuzzy tipe-2 interval untuk mengatasi kelemahan dalam penentuan batas – batas fungsi keanggotaan yang masih dilakukan dengan *trial and error*.
2. Menggunakan alat pengukuran yang memiliki akurasi tinggi untuk mendapatkan hasil terbaik.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] **IEO.** 2010 .“Indonesia Energy Outlook 2010”. Pusat Data dan Informasi Energi Sumber Daya Mineral Kementrian Energi Sumber Daya dan Mineral. Jakarta.
- [2] **KESDM.** 2014 .“Statistik Ketenagalistrikan 2014”, Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementrian Energi Dan Sumber Daya Nasional. Jakarta.
- [3] **Nurika Brilianti.** 2015 . “Implementasi Kontrol Fuzzy pada Sistem Penjejak Matahari Dua Derajat Kebebasan”.S1 Teknik Fisika. FTI-ITS. Surabaya
- [4] **Irawan Rahardjo, Ira Fitriana.** 2005. “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia.
- [5] **Imam Abadi.** 2015. “*Type-2 Fuzzy Logic Controller Based PV Passive Two-Axis Solar Tracking System*”. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), vol.10,N.3, ISSN 1827-6660.
- [6] **Catur Hilman A.H.B.B.** 2014. “Rancang Bangun *Dual-Axis PV Solar Tracker System* Menggunakan *Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller*”.S2 Teknik Fisika. FTI-ITS Surabaya.
- [7] **Abdul Adhim.** 2014. ”Perancangan Sistem Kontrol *Dual-Axis Pv Solar System* Menggunakan Particle Swarm Optimization”. S2 Teknik Fisika. FTI-ITS. Surabaya.
- [8] **Wahana Saputra.** 2008. “Rancang Bangun *Solar Tracking System* untuk Mengoptimalkan Penyerapan Energi Matahari pada *Solar Cell*”. Skripsi Universitas Indonesia. Depok.
- [9] **Degratu, S, Rizescu, S, Alboteanu, L, Caramida, C, Rotaru, P, Boncea, I. dan Iancu, C.** 2014, “ *Using a Shape Alloy Memory Spring Actuator to Increase the Performance of Solar Tracking System* “. Electrical Engineering Series.
- [10] **Imam Abadi.** 2015. “*Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller*”. International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S), Vol. 8,N.6 ISSN 1974-9821
- [11] **Peter Christianto, Darjat dan Iwan Setiawan.** “Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan *Adaptive Fuzzy Logic Controller*

Metode *Tuning Output*” . Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

- [12] **Manafeddin Namazov** . 2010 . “*DC Motor Position Control Using Fuzzy Proportional-Derivative Controllers with Different Defuzzification Methods*” . Turkish Journal Of Fuzzy Systems (eISSN:1309-1190), Turkey.
- [13] <http://www.ilmuskripsi.com/2016/05/model-fuzzy-sugeno.html>
- [14] <http://www.ilmuskripsi.com/2016/05/fuzzy-mamdani.html>
- [15] **Amir Gheibi, S.M.A Mohammadi, M.Maghfoori**. 2011. “*Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Generation Based on the Type-2 Fuzzy Logic Control Method*”. Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman,Iran.
- [16] **Karin Aryanti P.** 2015 . ”Perancangan Sistem Pengendalian Sudut *Pitch* dan *Yaw* pada Panel Surya Menggunakan Metode *Fuzzy PSO*”. S1 Teknik Fisika. FTI-ITS. Surabaya

LAMPIRAN

Tabel Kuat Pencahayaannya LDR Berbanding dengan Tegangan

Pukul	Kuat Pencahayaannya (lux)	V (Volt)				Cuaca
		1	2	3	4	
05.30	86	4,81	4,76	4,91	4,25	Sedikit Berawan
06.00	1988	3,3	3,2	3,55	2,8	Cerah
06.30	6570	3,15	3,09	3,33	2,67	Cerah
07.00	24800	2,07	1,85	2,5	1,82	Cerah
07.30	33600	1,81	1,62	2,11	1,68	Cerah
08.00	40000	1,81	1,66	2,16	1,66	Cerah
08.30	79200	1,25	1,18	1,6	1,25	Cerah
09.00	89200	1,12	1,06	1,3	1,04	Cerah
09.30	107700	1,06	1,04	1,28	0,97	Cerah
10.00	108200	1,04	1,01	1,22	0,95	Cerah
10.30	117500	1,01	0,98	1,19	0,89	Cerah
11.00	36000	1,71	1,67	2,2	1,41	Berawan
11.30	110600	1,03	0,96	1,55	0,83	Cerah
12.00	46200	1,59	1,48	1,98	1,24	Sedikit Berawan
12.30	37400	1,75	1,64	2,17	1,43	Berawan
13.00	84000	1,14	1,06	1,24	0,96	Cerah
13.30	76000	1,26	1,09	1,25	1,01	Cerah
14.00	11200	2,5	2,52	2,88	1,97	Berawan
14.30	21300	2,06	1,98	2,41	1,65	Berawan
15.00	16300	2,3	2,23	2,7	1,76	Berawan
15.30	356	4,89	4,5	4,98	4,32	Hujan
16.00	1823	3,3	3,19	3,54	2,76	Gerimis
16.30	1700	3,37	3,22	3,57	2,77	Gerimis
17.00	1659	3,41	3,21	3,55	2,85	Gerimis
17.30	400	4,43	4,4	4,73	4,13	Cerah

Tabel Kuat Pencahayaan LDR Berbanding dengan Resistansi

Pukul	Kuat Pencahayaan (lux)	R (Ohm)				Cuaca
		1	2	3	4	
05.30	86	2300	2200	2450	2100	Sedikit Berawan
06.00	1988	700	650	701	540	Cerah
06.30	6570	419	427	534	362	Cerah
07.00	24800	250	218	241	221	Cerah
07.30	33600	227	192	316	202	Cerah
08.00	40000	215	203	234	197	Cerah
08.30	79200	151	140	165	147	Cerah
09.00	89200	130	124	155	127	Cerah
09.30	107700	122	118	181	114	Cerah
10.00	108200	122	118	171	113	Cerah
10.30	117500	111	109	134	107	Cerah
11.00	36000	207	198	270	169	Berawan
11.30	110600	117	118	153	107	Cerah
12.00	46200	196	169	200	142	Sedikit Berawan
12.30	37400	202	194	267	164	Berawan
13.00	84000	133	130	166	105	Cerah
13.30	76000	136	134	206	108	Cerah
14.00	11200	300	306	356	250	Berawan
14.30	21300	237	230	270	190	Berawan
15.00	16300	250	246	279	198	Berawan
15.30	356	1230	1134	1200	1092	Hujan
16.00	1823	800	789	867	698	Gerimis
16.30	1700	821	798	881	719	Gerimis
17.00	1659	843	821	988	733	Gerimis
17.30	400	1043	1032	1120	790	Cerah

Tabel Data Radiasi Serta Suhu PV

Pukul	Radiasi (W)	Suhu (°C)
05.30	0,8171	24,1
06.00	20,415	24,3
06.30	61,981	25,6
07.00	191,871	25,8
07.30	261,425	26,3
08.00	334,91	26,4
08.30	641,54	27,4
09.00	661,87	29
09.30	781,091	29,4
10.00	791,88	29,6
10.30	876,181	30,3
11.00	891,881	31,6
11.30	901,654	32,8
12.00	965,818	31,7
12.30	910,234	31,4
13.00	900,172	31,1
13.30	887,165	30,3
14.00	718,181	29,5
14.30	612,817	29,4
15.00	516,191	27,9
15.30	351,198	26,4
16.00	312,143	26,3
16.30	181,165	26,3
17.00	50,16	25,8
17.30	15,98	25,7

Data Resistansi dan Induktansi Motor DC

L	R
6,378	21,09
6,392	21,24
6,388	21,34
6,394	21,47
6,389	21,57
6,387	21,66
6,392	21,75
6,395	21,85
6,391	21,87
6,393	21,91
6,391	22,01
6,389	22,07
6,384	22,18
6,385	22,21
6,384	22,28
6,392	22,36
6,391	22,4
6,384	22,46
6,392	22,49
6,392	22,51
6,389	22,57
6,391	22,63
6,39	22,68
6,389	22,72
6,384	22,75
6,388	22,79
6,386	22,83

Data Resistansi dan Induktansi Motor DC(Lanjutan)

6,382	22,86
6,391	22,88
6,384	22,9
6,389	22,93
6,385	22,95
6,363	23,02
6,38	23,01
6,379	23,05
6,371	23,09
6,385	23,07
6,383	23,12
6,379	23,18
6,381	23,23
6,3863	22,4245

Data Tegangan dan Arus Motor DC

Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
1	0,07
2	0,08
3	0,09
4	0,1
5	0,1
6	0,11
7	0,114
8	0,12
9	0,12

10	0,125
11	0,13
12	0,14

Data Kecepatan Motor DC

RPM 1	RPM 2	RPM 3	RPM 4	RPM 5
0,746888	0,738589	0,987552	0,73029	0,751037
1,147303	1,151452	1,128631	1,157676	1,153527
1,514523	1,599585	1,609959	1,614108	1,614108
2,091286	2,089212	2,09751	2,095436	2,103734
2,558091	2,556017	2,564315	2,560166	2,564315
3,049793	3,045643	3,039419	3,041494	3,043568
3,439834	3,533195	3,524896	3,529046	3,53527
4,016598	4,026971	4,029046	4,024896	4,020747
4,394191	4,518672	4,520747	4,518672	4,400415
4,848548	5,008299	5,010373	5,018672	4,93361
5,479253	5,512448	5,504149	5,508299	5,510373
6,006224	5,908714	6,016598	6,008299	6,014523

Data Simulasi Tracking Sudut Elevasi Matahari

Waktu	Sudut Pitch	Sudut Altitude	Error
05.30	0	0,1585	0,1585
06.00	7,231111633	7,597	0,365888
06.30	14,85030884	15,03	0,179691
07.00	22,38458762	22,46	0,075412
07.30	29,81847637	29,88	0,061524
08.00	37,23107472	37,29	0,058925
08.30	44,61371894	44,67	0,056281
09.00	51,94009639	52,02	0,079904

09.30	59,18381063	59,31	0,126189
10.00	66,22869984	66,47	0,2413
10.30	72,92044206	73,3	0,379558
11.00	79,61486519	79,4	-0,21487
11.30	82,83076541	82,28	-0,55077

Data Simulasi Tracking Sudut Elevasi Matahari(Lanjutan)

12.00	80,64573396	79,1	- 1,54573
12.30	73,83265207	72,97	- 0,86265
13.00	66,73396644	66,06	- 0,67397
13.30	59,40721732	58,89	- 0,51722
14.00	52,12531274	51,6	- 0,52531
14.30	44,64543682	44,24	- 0,40544
15.00	37,2192641	36,86	- 0,35926
15.30	30,29366478	29,45	- 0,84366
16.00	22,702352	22,03	- 0,67235
16.30	15,16245844	14,6	- 0,56246
17.00	7,617774703	7,164	- 0,45377
17.30	0,826762339	0,2745	- 0,55226
		Rata-rata	- 0,27826

Data Simulasi Tracking Sudut Azimuth Matahari

Waktu	Sudut Yaw	Sudut Azimuth	Error
05.30	90,46	90,48	0,02
06.00	91,39	91,42	0,03
06.30	92,39825936	92,43	0,031740642
07.00	93,48258398	93,51	0,027416019
07.30	94,69818266	94,73	0,031817344
08.00	96,11597415	96,15	0,034025846
08.30	97,85271409	97,89	0,037285905
09.00	100,057271	100,1	0,042728994
09.30	103,2443692	103,3	0,055630765
10.00	108,1170946	108,2	0,082905359
10.30	116,8350963	117	0,164903668
11.00	135,8279263	136,4	0,572073667
11.30	186,0532907	180	-6,05329069
12.00	223,8374539	225,2	1,362546115

Data Simulasi Tracking Sudut Azimuth Matahari(Lanjutan)

12.30	243,3474731	243,7	0,352526876
13.00	251,9929367	252,1	0,107063301
13.30	256,8518652	256,9	0,048134783
14.00	259,9536692	260	0,046330751
14.30	262,182443	262,2	0,017556998
15.00	263,8891714	263,9	0,010828626
15.30	265,2207079	265,3	0,07929214
16.00	265,3157049	266,6	1,284295101
16.30	267,5918496	267,6	0,008150432
17.00	268,6237751	268,62	-0,00377513

17.30	269,6240997	269,62	-0,00409974
		Rata-Rata	-0,06455

Data Hasil Simulasi Arus Keluaran PV

Waktu	MPV	FPV
05.30	-0,08897	-0,08911
06.00	-0,03895	-0,06577
06.30	0,064915	-0,01189
07.00	0,389524	0,162368
07.30	0,563222	0,263543
08.00	0,746806	0,369845
08.30	1,51231	0,795014
09.00	1,562027	0,820614
09.30	1,859288	0,984092
10.00	1,886048	1,013137
10.30	2,095781	1,201554
11.00	2,133753	1,438814
11.30	2,150479	1,720714
12.00	2,317286	1,546738
12.30	2,179609	1,243236
13.00	2,154856	1,162404

Data Hasil Simulasi Arus Keluaran PV(Lanjutan)

13.30	2,123163	1,129701
14.00	1,702195	0,89879
14.30	1,439331	0,754956
15.00	1,198972	0,618363
15.30	0,787499	0,384682
16.00	0,68987	0,319337
16.30	0,362676	0,13769
17.00	0,035359	-0,03072

17.30	-0,05006	-0,07253
-------	----------	----------

Data Hasil Simulasi Tegangan Keluaran PV

Waktu	MPV	FPV
05.30	15,81688	15,81673
06.00	15,87169	15,84192
06.30	15,9823	15,89705
07.00	16,34189	16,08975
07.30	16,5329	16,20025
08.00	16,73631	16,31789
08.30	17,58242	16,78623
09.00	17,63185	16,80888
09.30	17,96037	16,9889
10.00	17,98935	17,02042
10.30	18,21964	17,22705
11.00	18,25711	17,48572
11.30	18,27135	17,79431
12.00	18,46047	17,60516
12.30	18,30873	17,26935
13.00	18,28233	17,18071
13.30	18,25003	17,14729
14.00	17,78564	16,89386

Data Hasil Simulasi Tegangan Keluaran PV(Lanjutan)

14.30	17,49422	16,73456
15.00	17,23282	16,58834
15.30	16,78148	16,33436
16.00	16,67348	16,26218
16.30	16,31029	16,06056
17.00	15,94877	15,87542

17.30	15,85431	15,82938
-------	----------	----------

Data Hasil Simulasi Daya Keluaran PV

Waktu	MPV	FPV
05.30	-1,40724	-1,40937
06.00	-0,61818	-1,04189
06.30	1,037491	-0,18897
07.00	6,365555	2,612457
07.30	9,311698	4,269465
08.00	12,49878	6,035093
08.30	26,59007	13,34528
09.00	27,54142	13,7936
09.30	33,3935	16,71864
10.00	33,92878	17,24402
10.30	38,18437	20,69923
11.00	38,95616	25,1587
11.30	39,29216	30,61893
12.00	42,77818	27,23057
12.30	39,90587	21,46988
13.00	39,39578	19,97092
13.30	38,7478	19,3713
14.00	30,27463	15,18403
14.30	25,17998	12,63385
15.00	20,66167	10,25761

Data Hasil Simulasi Daya Keluaran PV(Lanjutan)

15.30	13,2154	6,283535
16.00	11,50253	5,193118
16.30	5,915349	2,211378
17.00	0,56394	-0,48775
17.30	-0,79369	-1,14804

Diagram Blok Simulink Motor DC

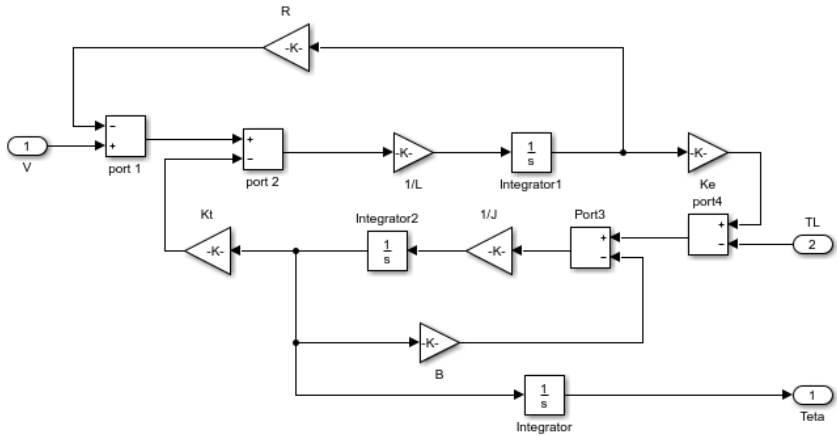


Diagram Blok Simulink Posisi Matahari

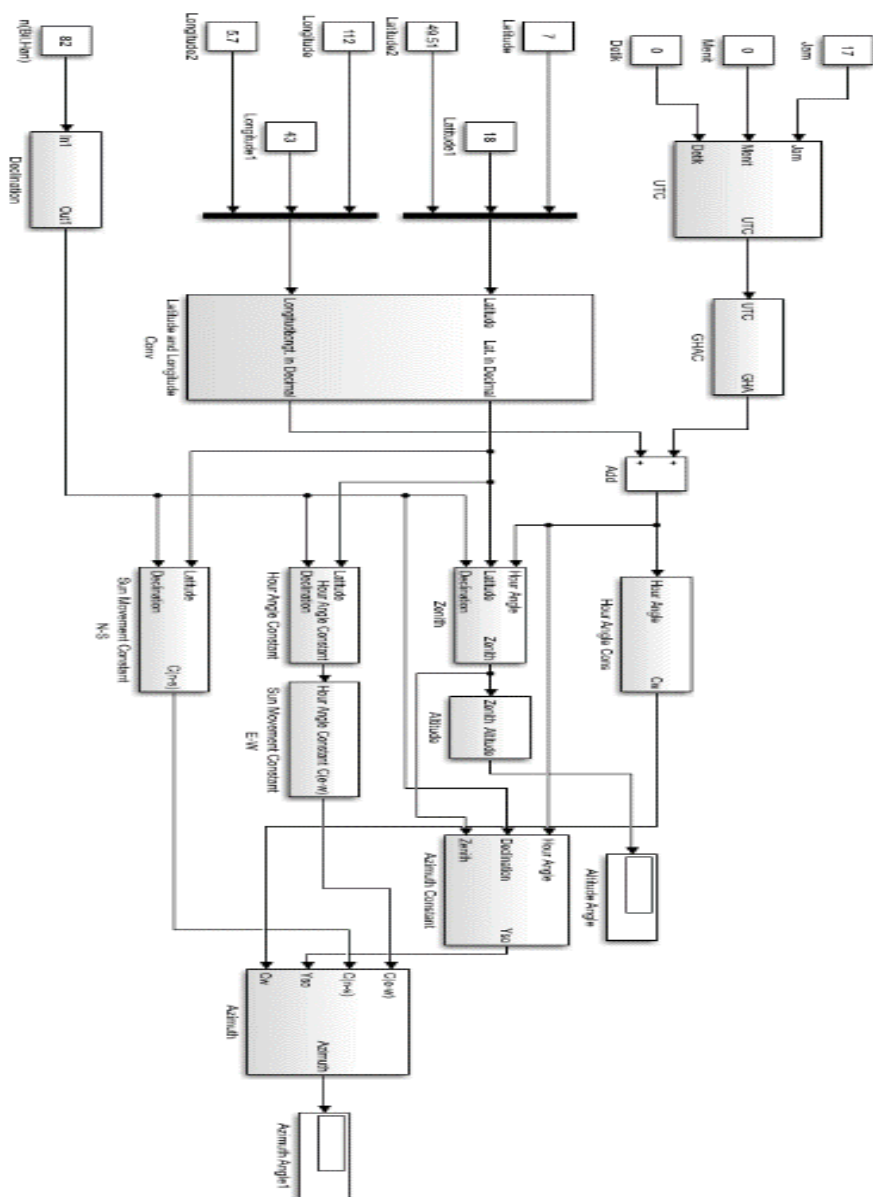


Diagram Blok Simulink Sensor LDR

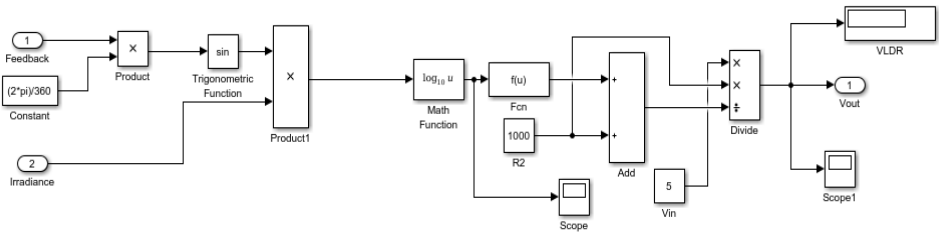


Diagram Blok Simulink Panel Surya

